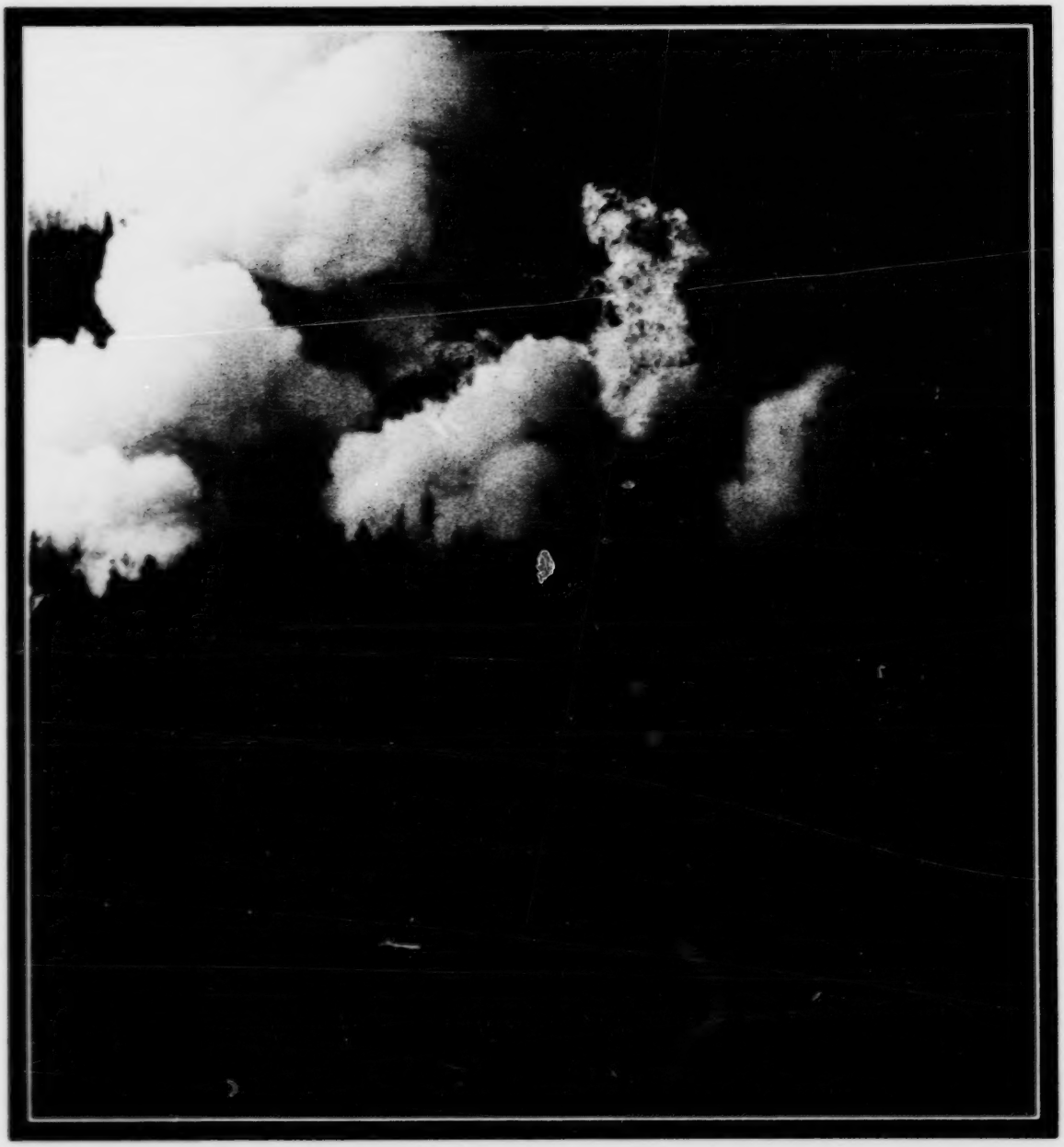
Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System



Canada

Government of Canada
Gouvernement du Canada

Canadian Forestry Service
Service canadien des forêts

87-06475/

THE CANADIAN FORESTRY SERVICE
GOVERNMENT OF CANADA

The Canadian Forestry Service is the principal source of federal expertise in forestry. Its general objective is to promote the wise management and use of Canada's forest resources for the economic, social, and environmental benefit of Canadians.

The following are the main functions of the CFS:

1. Coordination of federal policies, for the promotion of better resource management and forest industry development.

2. Provision of scientific and technological leadership in forestry through research and development.

3. Provision and analysis of national and international statistics and information as a basis for policy formulation.

4. Development and certification of codes and standards for wood product performance.

5. Protection of Canada's forests from foreign pests.

6. Fostering the potential use of the forest resource for energy.

7. Contributing to the environmental objectives of the government of Canada.

A number of federal agencies are involved in forestry programs and a Federal Forestry Sector Strategy Committee has been established to coordinate federal forestry activities. The Canadian Forestry Service has been designated the lead agency role.

The Canadian Forestry Service is comprised of a headquarters unit, six forestry centres and two national institutes. The forestry centres are responsive to regional priorities and maintain close liaison with the respective provincial government forestry departments and other clients. They also participate in, and frequently lead, national programs. The national institutes provide the focus for programs of national scope.

Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System

C.E. Van Wagner

Petawawa National Forestry Institute
Chalk River, Ontario

Résumé en français

Canadian Forestry Service
Forestry Technical Report 35
Ottawa 1987

© Minister of Supply and Services Canada 1987

Catalog No. FO64-35/1987E
ISBN 0-662-15198-4

Additional copies of this publication are available at no charge from:

Canadian Forestry Service
Place Vincent Massey, 3rd Floor
Ottawa, Ontario
K1A 1G5

A microfiche edition of this publication may be purchased from:

Micromedia Ltd.
158 Pearl Street
Toronto, Ontario
M5H 1L3

Cette publication est aussi disponible en français sous le titre
Élaboration et structure de l'Indice Forêt-Météo de la méthode canadienne.

CONTENTS

	Page
PREFACE	vi
ABSTRACT	vii
RÉSUMÉ	viii
INTRODUCTION	1
THE BASIC STRUCTURE OF THE FIRE WEATHER INDEX SYSTEM	2
THE FINE FUEL MOISTURE CODE	4
Background	4
Scale	4
Drying Phase	4
Rainfall Phase	8
THE DUFF MOISTURE CODE	10
Background	10
Scale	10
Rainfall Phase	10
Drying Phase	12
THE DROUGHT CODE	13
Background	13
Scale	14
Rainfall Phase	14
Drying Phase	14
Overwintering	14
SCALE FOR THE FIRE WEATHER INDEX	16
THE INITIAL SPREAD INDEX	19
Background	19
The Wind Function	19
The Fine Fuel Moisture Function	20
The ISI Equation	21
THE BUILDUP INDEX	22

THE FIRE WEATHER INDEX 23

The Duff Moisture Function 23

The FWI Equation 24

The Daily Severity Rating 25

THE FIRE WEATHER INDEX SYSTEM IN USE 26

Calculation 26

Interpretation 26

Calibration 28

Danger Classes 29

Latitude 29

Conclusion 30

REFERENCES 32

APPENDIX I 36

Symbols 36

FIGURES

		Page
1.	Block diagram of the Fire Weather Index System.	3
2.	Graph of scales linking FFMC to fine fuel moisture content.	5
3.	Variation of log drying rate k with T, H, and W in the FFMC: a) k *vs* T at constant H and W, b) k *vs* H at constant T and W, c) k *vs* W at constant T and H. Constant values are T = 21.1°C, H = 45%, W = 12 km/h.	6
4.	Isotherms of equilibrium moisture content E *vs* relative humidity H at 21.1°C.	7
5.	Graph of scale linking DMC to duff moisture content.	11
6.	Graph of scale linking DC to its moisture equivalent Q.	13
7.	Graph of I–scale and the relation between the intensity of experimental fires and D–scale.	16
8.	Four danger scales (I, B, S, and D) all graphed against D–scale, showing the two design points for the S–scale.	17
9.	Effect of wind speed on relative spread rate in the ISI, along with wind effects from five sources. (Shape and slope of curves is relevant — their relative position is not).	19
10.	Effect of fine fuel moisture (FFM) on relative spread rate in the ISI, along with FFM effects from three sources. (Shape and slope of curves is relevant — their relative position is not).	21
11.	Effect of BUI on relative intensity in the FWI, showing new function above BUI 80, plus curve based on heat-transfer theory.	24

TABLES

		Page
1.	Properties of the three fuel moisture codes	2
2.	Daylength factor L_e in Duff Moisture Code	12
3.	Daylength adjustment L_f in Drought Code	15

PREFACE

The original Canadian Forest Fire Weather Index System issued in 1970 was the result of four years' effort, in which many fire research staff of the Canadian Forestry Service took part. The principal work was done by S.J. Muraro and J.A. Turner of the Pacific Forest Research Centre (now the Pacific Forestry Centre), A.J. Simard of the Forest Fire Research Institute (later amalgamated with the Petawawa National Forestry Institute), and C.E. Van Wagner of the Petawawa Forest Experiment Station (now the Petawawa National Forestry Institute). D.E. Williams, Director of the Forest Fire Research Institute, acted as coordinator of the project, which involved voluminous correspondence and several full-scale meetings. Others who contributed in various ways and gave advice and opinion as the system developed included R.C. Henderson, B.D. Lawson, and R.N. Russell of the Pacific Forest Research Centre, A.D. Kiil, D. Quintilio, and J.E. Grigel of the Northern Forest Research Centre (now Northern Forestry Centre), B.J. Stocks and J.D. Walker of the Great Lakes Forest Research Centre (now Great Lakes Forestry Centre), E.W. Howard and D.B. Bradshaw of the Newfoundland Forest Research Centre (now Newfoundland Forestry Centre), and D.G. Fraser, L.B. MacHattie, P.M. Paul, L. Pouliot, and Gy. Péch of the Forest Fire Research Institute. Finally, J.C. Macleod, Program Coordinator for Forest Fire Research, provided beneficial influence and support throughout.

Subsequent maintenance and further development of the Fire Weather Index System has been in the hands of the Candian Forestry Service's Fire Danger Working Group, currently comprising M.E. Alexander of the Northern Forestry Centre, B.D. Lawson of the Pacific Forestry Centre, B.J. Stocks of the Great Lakes Forestry Centre, and C.E. Van Wagner of the Petawawa National Forestry Institute.

The present publication is a revision of Departmental Publication 1333, "Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index" issued in 1974 by the Canadian Forestry Service, Department of Environment.

ABSTRACT

The Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System was first issued in 1970 after several years' work by a number of fire researchers in the Canadian Forestry Service. The best features of the former fire danger index were incorporated in the FWI, and a link was preserved between old and new. The FWI is based on the moisture content of three classes of forest fuel plus the effect of wind on fire behavior. The system consists of six components: three primary subindexes representing fuel moisture, two intermediate subindexes representing rate of spread and fuel consumption, and a final index representing fire intensity as energy output rate per unit length of fire front. The FWI System refers primarily to a standard pine fuel type but is useful as a general measure of forest fire danger in Canada. Its components are determined every day from noon weather readings: temperature, relative humidity, wind speed, and rain (if any). The development of the Fire Weather Index, the concepts behind it, and its mathematical structure are described in this paper. Revised versions of the Fire Weather Index System were issued in 1976 and 1984.

RÉSUMÉ

L'Indice Forêt-Météo (IFM) est un indice des conditions météorologiques propices aux incendies de forêts. Il a été publié en 1970 après plusieurs années de travaux par des agents de recherche du Service canadien des forêts. Les meilleures caractéristiques de l'ancien indice de danger de feu ont été retenues dans le nouvel indice et un lien a été conservé entre l'ancien et le nouveau. L'IFM est fondé sur la teneur en humidité de trois classes de combustibles forestiers, plus l'effet du vent sur le comportement du feu. Il consiste en six composantes: trois sous-indices primaires représentant l'humidité du combustible, deux sous-indices intermédiaires représentant le taux de propagation du feu et la consommation des combustibles, et un indice final représentant l'intensité de feu sous forme de rendement énergétique par unité de longueur. L'IFM se réfère fondamentalement à une forêt standard de pin, mais sert utilement comme indice général du danger d'incendies de forêts au Canada. C'est par des observations journalières des conditions météorologiques, à midi, qu'on le rédige: température, humidité relative, vitesse du vent et pluviosité (si elle existe). Ce document décrit le développement de l'IFM, les concepts qui ont présidé à sa préparation, et sa structure mathématique. De nouvelles versions de l'IFM ont été publiées en 1976 et 1984.

Correct citation:

Van Wagner, C.E. 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., Ottawa, Ont. For. Tech. Rep. 35.

INTRODUCTION

Since research on forest fire danger rating was begun in Canada by J.G. Wright in 1925, the value of keeping track of the day-to-day susceptibility of the forest to fire has gained complete acceptance throughout the nation. During the ensuing several decades, Wright, his colleague H.W. Beall, and their successors developed four different fire danger systems with increasingly universal applicability across Canada. Type references for these systems are (1) Wright (1933), (2) Wright and Beall (1938) with supplement by Beall (1939), (3) Beall (1948), and (4) Forestry Branch (1957). During the decade following 1957, additional versions of the fourth system were issued for the various regions of Canada, each version based on field research in the fuel types of local importance (Forestry Branch 1959, Kiil and MacTavish 1962, Paul and MacTavish 1965, and MacTavish 1965).

Much space would be required to present the full history of research on forest fire danger rating in Canada, and this is not necessary for present purposes. Although Beall's (1947) account covers the early years very well, three concepts are worth emphasizing. First, the development process was one of evolution in which certain features, even though modified, were retained from system to system. Second, there was a trend toward simplification in both the required weather measurements and the method of calculation, which culminated in the fourth system during the 1950s. Third, the approach throughout was to base the danger ratings on field experiments analyzed by empirical mathematics; physical theory, although used qualitatively to good advantage in the design of the experiments, was not used directly in the analysis leading to the final results. As a result of this philosophy, there exists a great body of field data of three kinds: weather readings, fuel moisture contents, and small test-fire ratings all linked together. All the foregoing systems of fire danger rating rest on this foundation.

The early field practices used to collect field data for danger rating were described by Paul (1969), and the procedures for day-to-day operations by Williams (1964). All early research data on file have been catalogued and organized for computer analysis by Simard (1970a).

As of 1969, the fourth system (in nine different versions) was in almost universal use across Canada. Its basic features were:

1. Noon weather readings of rain, relative humidity, and wind (temperature as well, in several of the later versions);
2. Separate fire danger indexes for different seasons;
3. Fine fuel moisture content estimated from day to day with the previous day's estimate as the starting point;
4. Long-term weather effects measured by a drought index in terms of days since a rainfall of about 15 mm, to a limit of 25 days;
5. Fine fuel moisture and drought blended to give fire danger on a scale of 0 to 16, with five classes (Nil, Low, Moderate, High, and Extreme);
6. In the later versions only, a correction for the effect of wind on fire behavior;
7. Subsidiary hazard indexes for specific fuel types such as "fast-drying," slash, grass, and reindeer lichen.

In the years leading to 1970, the forest fire control agencies became more and more sophisticated and made increasing demands on this fire danger system in ways that were not foreseen during its development in the mid–1950s. In response to comments and requests from a number of provincial fire control agencies, development of a new fire danger rating index was undertaken. It was called the Canadian Forest Fire Weather Index after a suggestion by J.C. Macleod, and its basic form was proposed by Muraro (1968). No additional weather observations were to be required, but the trend toward further simplification was to be reversed to some extent. The aim throughout the project was to use as much of the previous fire danger work as possible, by building on the best features and adding new components where necessary. The original version of the Fire Weather Index and its subsidiary components was issued in 1970 (Canadian Forestry Service 1970). Subsequent editions of the index tables appeared in 1976, 1978, and 1984 (Canadian Forestry Service 1976, 1978, 1984). These incorporated some mathematical changes as well as a conversion from imperial to metric weather units; however, the basic continuity of output has been maintained. The Fire Weather Index System thus retains a solid link with previous systems and is, in effect, a further step along the same path taken by J.G. Wright when he founded Canadian research on forest fire in 1925.

THE BASIC STRUCTURE OF THE FIRE WEATHER INDEX SYSTEM

The Fire Weather Index (FWI) System comprises six standard components. The first three are fuel moisture codes that follow daily changes in the moisture contents of three classes of forest fuel with different drying rates. The last three components are fire behavior indexes representing rate of spread, fuel weight consumed, and fire intensity. The system depends solely on weather readings taken each day at noon local standard time (LST): temperature, relative humidity, wind speed, and rain (if any) during the previous 24 hours. The current month must also be specified. In basic form, the FWI System is a set of equations (Van Wagner and Pickett 1985) that can be readily processed by computer; this is in contrast to previous systems, in which the basic form was always a set of curves that were converted directly to tables. The FWI can also be worked out from the published set of nine tables derived directly from these equations (Canadian Forestry Service 1984).

It should be understood that although the FWI is calculated from noon weather readings, it really represents fire danger at its midafternoon peak, generally specified as 1600 hours. This comes about because, in the original work, the noon weather variables were correlated with fine fuel moisture data and test-fire results taken later in the afternoon. In this respect, the FWI System is similar to all previous Canadian systems used since 1938.

For each of the three fuels embodied in the FWI System a subsidiary index was developed with two phases, one for wetting by rain and one for drying. These subindexes, called fuel moisture codes, are in fact bookkeeping systems that add moisture after rain and subtract some for each day's drying. They are arranged in code form with values rising as moisture content decreases for the best psychological effect. The three moisture codes and their corresponding fuels are:

1. *Fine Fuel Moisture Code (FFMC)*, which represents the moisture content of litter and other cured fine fuels in a forest stand, in a layer of dry weight about 0.25 kg/m^2;

2. *Duff Moisture Code (DMC)*, which represents the moisture content of loosely compacted, decomposing organic matter weighing about 5 kg/m^2 when dry;

3. *Drought Code (DC)*, which represents a deep layer of compact organic matter weighing perhaps 25 kg/m^2 when dry.

Although these descriptions are useful for explanatory purposes, comparison of the moisture codes is best made in terms of water capacity and drying speed. Each fuel is considered to dry exponentially, so that its instantaneous drying rate is proportional to its current free moisture content. The proper measure of drying speed is either the timelag (i.e. time to lose $1-1/e$ [about 2/3] of the free moisture above equilibrium), or the slope of the exponential curve of free moisture content over time, here called the log drying rate. Table 1 gives for each moisture code the timelag in terms of normal days (with noon temperature 21.1°C (70°F) and relative humidity 45 percent in July), as well as its water capacity, fuel properties, and the daily weather parameters required for calculation.

The two slow-reacting moisture codes, the DMC and DC, respond to changing daylength as the season progresses. This feature is necessary because the amount of moisture lost daily by slow-drying fuels is as much dependent on the time available as on the noon atmospheric conditions. The midafternoon moisture content of fast-drying fuels, represented by the FFMC, is less dependent on day length.

Table 1. Properties of the three fuel moisture codes

Code	Timelag days	Water capacity mm	Required parameters[1]	Nominal fuel depth cm	Nominal fuel load kg/m^2
FFMC	2/3	0.6	T, H, W, r	1.2	0.25
DMC	12	15	T, H, r, mo	7	5
DC	52	100	T, r, mo	18	25

[1]T — temperature, H — humidity; W — wind, r — rain, mo — month.

The three moisture codes plus wind are linked in pairs to form two intermediate indexes that are in turn combined to yield the final index, the FWI (Figure 1). These last three components are:

Initial Spread Index (ISI), a combination of wind and the FFMC that represents rate of spread alone without the influence of variable quantities of fuel;

Buildup Index (BUI), a combination of the DMC and the DC that represents the total fuel available to the spreading fire;

Fire Weather Index (FWI), a combination of the ISI and the BUI that represents the intensity of the spreading fire as energy output rate per unit length of fire front.

Each of these components involves mathematical functions described in later sections, and each component has an appropriate scale. The function of wind in the ISI is a simple exponential that doubles the FWI for every increase of 19 km/h. The functions of fine fuel moisture and duff moisture are similar to those found in the previous fire danger system. Long-term drought effect was worked in by giving the DC a small but variable weight as an adjustment to the DMC.

The so-called standard fuel type can be described as a generalized pine forest, most nearly the jack pine and lodgepole pine type, which is found in an almost continuous band across Canada. This concept fits the nature of the field data that form the foundation for the FWI. Actually, fuel moisture data and fire behavior data from red and white pine stands and red pine plantations were also used in the development of the FWI. It was decided early on, however, that the main goal was a new fire danger index based solely on weather that could be used to give uniform results throughout Canada. The question of how fire behavior varies with fuel type was judged to be a separate problem, to be tackled in other ways.

In the following sections of this paper, the three moisture codes and the three final components are each described in turn. Finally, there are sections on the interpretation and performance of the FWI and on its future use and development. The procedures and reasoning used in the development are recounted where needed to shed light on the various decisions. Equations are also included in order, as integral parts of the story. The symbols and abbreviations are identified as they are introduced, and all symbols are listed as well in Appendix I. Natural logarithms (to base *e*) are indicated by "ln", common logarithms (to base 10) by "log."

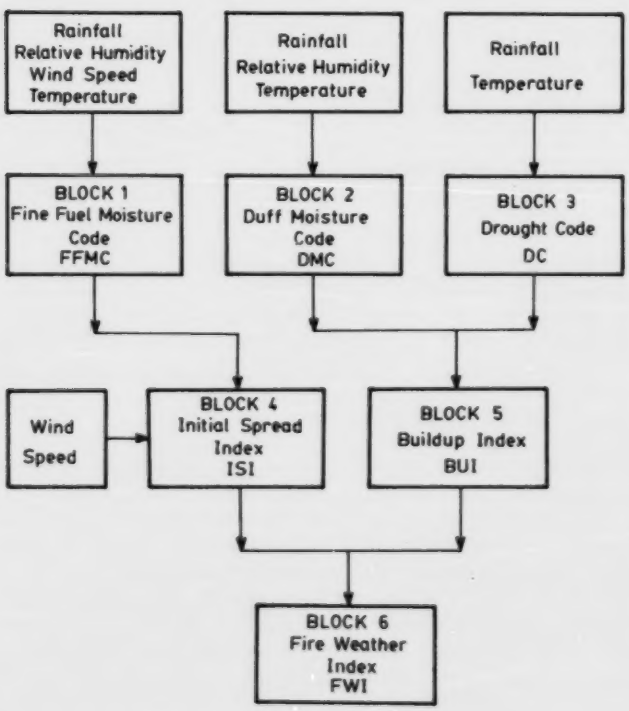


Figure 1. Block diagram of the Fire Weather Index System.

THE FINE FUEL MOISTURE CODE

BACKGROUND

The ancestor of the Fine Fuel Moisture Code (FFMC) is the Tracer Index for litter that first appeared as the principal component of an early fire danger rating system for eastern pine forests (Wright 1937). The Tracer Index was developed from concurrent weather and fuel-moisture data obtained in pine stands at Petawawa by multiple correlation of present moisture content with current weather and the previous day's moisture content. The fuel represented was a layer of pine needles or other surface litter, probably about 0.25 kg/m^2. This fuel can be called relatively fast-drying, but the substantial effect of the previous day's value meant that drying time was by no means instantaneous. In subsequent years, this Tracer Index was found by various fire researchers to correlate well with litter moisture contents in many parts of Canada; it was retained, therefore, as an integral part of all subsequent fire danger tables issued by the federal forest research organization. The particular version of the Tracer Index chosen for this work appears in Beall's (1948) Forest Fire Danger Tables. The special needs of the new system required analysis and modification of the original Tracer Index.

The following description of the Fine Fuel Moisture Code is fairly complete because there is no other substantial reference to it.

SCALE

The original Tracer Index was presented in the simple code form of 150 minus moisture content. Because the highest and lowest tracer values were 144 and 40, the scale length was 104. For the tabular version of the new system, a two-digit code was desired with maximum value of 99, a scale length 5 points less than the original. The minimum moisture content (m) was set at 2 percent, resulting in a scale equation

$$F = 101 - m \tag{1}$$

where F is FFMC. This scale was the basis of the FFMC in the first three editions of the FWI System, but was changed in the 1984 version on the following grounds:

1) The real moisture content of pine litter ranges up to about 250 percent.

2) A realistic moisture scale was desired to render the standard FFMC compatible with future developments in fine fuel moisture prediction.

A new scale, the FF scale, was devised, described by the following equations:

$$F = 59.5\ (250-m)/(147.2 + m) \tag{2a}$$

$$m = 147.2\ (101-F)/(59.5 + F) \tag{2b}$$

This scale (see Figure 2) permits realistic conversions from code to moisture content, allows the internal operations of the FFMC to be carried out on moisture content value, and retains the traditional code scale for quoting the FFMC itself. Furthermore, the former artificial 2 percent minimum limit on moisture content is no longer deemed necessary in computing practice. The potential code scale length is now 101.

DRYING PHASE

The first step in analyzing the Tracer Index was to list a series of day-to-day drying sequences, each at constant relative humidity (H), wind (W), and temperature (T), by starting at saturation and repeatedly entering the Tracer Index tables until no further change occurred. The resulting equilibrium moisture content (E) for each drying sequence was subtracted from the day-to-day moisture contents (m) and the free moisture contents were plotted as log (m–E) against time in days. In this way, a set of six semilog curves at different wind speeds was obtained for each of eight humidity classes, all for the original temperature class 60 – 80°F (15.6 – 26.7°C). The class midpoint 70°F (21.1°C) was then taken to be the normal temperature for the whole analysis.

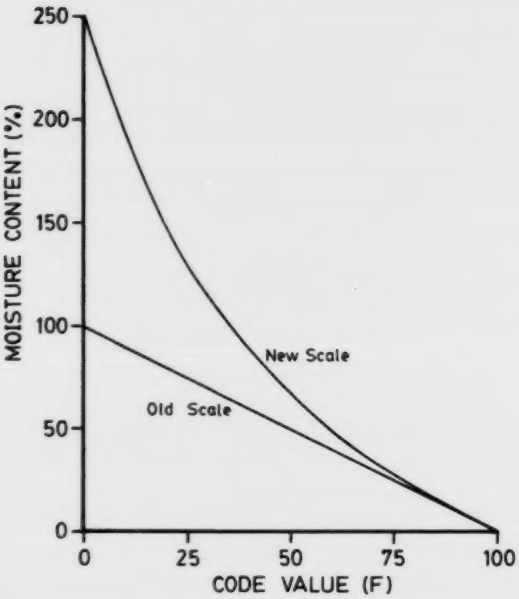


Figure 2. Graph of scales linking FFMC to fine fuel moisture content.

It was observed that, on the whole, these semilog lines were straight enough that exponential drying could be assumed. In other words, regardless of actual moisture content, the rate of change from day to day could be described by the slope of the semilog drying curve, called the log drying rate (k) and expressed in units of log moisture content per day.

Second, values of k were calculated for the 48 semilog curves, then plotted against W in classes of H, and finally harmonized in the form

$$k = a + bW^{0.5} \tag{3}$$

where a and b are functions of H arranged to equal zero when H = 100. The complete equation in terms of H and W is

$$k_o = 0.424[1-(H/100)^{1.7}] + 0.0694W^{0.5}\,[1-(H/100)^8] \tag{4}$$

using k_o to indicate the log drying rate at the normal temperature of 21.1°C. The variation of k_o with H and W is illustrated in Figure 3. The use of the square root of wind emphasizes the proportionally greater effect of wind on drying rate at lower wind speeds, evident in both the Tracer Index and in the theory and laboratory evidence of Van Wagner (1979).

Third, the process of atmospheric wetting at high humidity was examined. By starting at maximum dryness, 24 semilog curves of day-to-day increases were obtained analogous to the drying curves. The variation in slope turned out to be very slight, around an average k value of 0.3. This constant value was incorporated into the first three editions of tables for the FWI system (Canadian Forestry Service 1970, 1976, 1978). But physical logic argues that the atmospheric wetting rate must be controlled by temperature and relative humidity, and evidence from both laboratory and field support this judgment. Accordingly, variation in wetting rate has been incorporated into the latest version of the FWI system tables (Canadian Forestry Service 1984) by recasting the drying rate equations in terms of 100–H instead of H, as follows:

$$k_o = 0.424\left[1-\left(\frac{100-H}{100}\right)^{1.7}\right] + 0.0694W^{0.5}\left[1-\left(\frac{100-H}{100}\right)^{8}\right] \tag{5}$$

where k_o is, in this case, the log wetting rate at the normal temperature of 21.1°C.

Fourth, the effect of temperature on drying and wetting rates was assigned from laboratory evidence. The temperature effect in the original Tracer Index was deemed too weak, providing only a 15 percent increase in drying rate for a 20°F (11.1°C) rise in temperature, whereas laboratory tests on pine needles indicated a 50 percent increase. The function to accomplish this temperature effect is, for temperature in degrees Celsius,

$$k = k_o \times 0.581e^{0.0365T} \quad (6)$$

where k is either log drying rate (k_d) or log wetting rate (k_w) in units of log moisture content per day. In the published account of these laboratory tests (Van Wagner 1979), the temperature effect becomes a straight line when graphed as log k versus the reciprocal of absolute temperature. The relation in Equation 6 above is essentially equivalent and is illustrated in Figure 3.

In the first edition of tables of the FWI system (Canadian Forestry Service 1970 and 1972), the FFMC was presented as one main table in terms of H and W, with a subsidiary table for temperature correction. Although expedient then, the results were not quite true to the mathematics. In later editions, separate tables in H and W have been given for each range of T, thus expressing the equations in proper fashion.

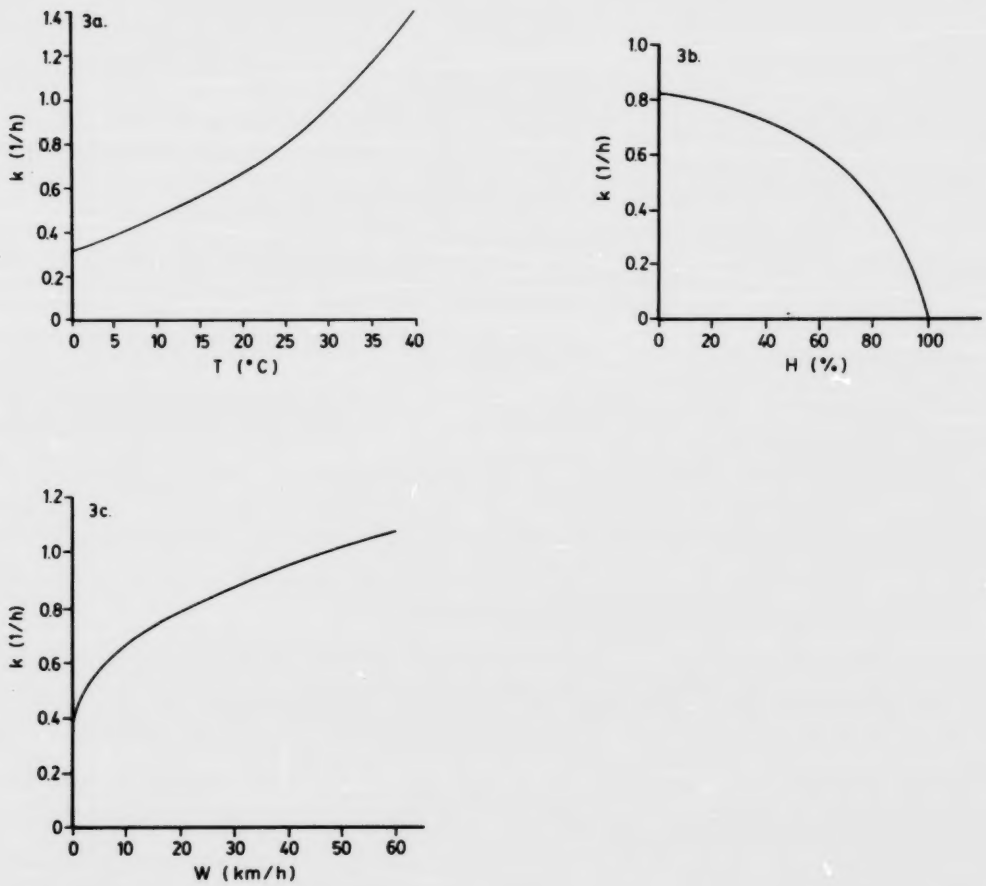


Figure 3. Variation of log drying rate k with T, H, and W in the FFMC: a) k vs T at constant H and W, b) k vs H at constant T and W, c) k vs W at constant T and H. Constant values are T = 21.1°C, H = 45%, W = 12 km/h.

Fifth, values of equilibrium moisture content E from the first step above were graphed, and the curves smoothed and partly modified in accordance with laboratory results for several kinds of forest litter (Van Wagner 1972a). In the original Tracer Index, values of E obtained by wetting were 1 to 2 percentage points lower than those obtained by drying. This hysteresis, also found in the laboratory, was retained in the present system. The new E curves, however, were made independent of wind speed, in contrast to the original. This was done partly for simplicity, and partly because in theory E should depend only on H and T.

This analysis of equilibrium moisture content (E), carried out for the original temperature class 60–80°F, was taken as valid for the normal temperature 70°F (or 21.1°C). Because the original Tracer Index showed no variation in E with temperature T, a temperature effect on E was therefore based on laboratory tests (Van Wagner 1972a). These indicated a shift of about 1 percentage point in E for every 10°F (5.6°C) change in T in the opposite direction.

The two curves of E *vs* H at the normal T (called isotherms), one for wetting and one for drying, were matched by an equation form supplied by J.A. Turner (Canadian Forestry Service, Pacific Forestry Centre), as follows:

$$E = a\,H^{b} + c\,e^{(H-100)\,d} \tag{7}$$

where a, b, c, and d are constants. To this basic form, the temperature effect was applied as an additive based on 21.1°C. Also, to provide for the convergence of both equations at zero when H = 0, an additional correction term, taking effect as H approaches zero, was designed. The complete equations for E in terms of H and T then emerge as

$$E_d = 0.942H^{0.679} + 11e^{(H-100)\,10} + 0.18(21.1-T)(1-e^{-0.115H}) \tag{8a}$$

$$E_w = 0.618H^{0.753} + 10e^{(H-100)\,10} + 0.18(21.1-T)(1-e^{-0.115H}) \tag{8b}$$

where E_d is the equilibrium moisture content obtained by drying from above, and E_w the equilibrium moisture content obtained by wetting from below, in percent moisture content based on dry weight. These are illustrated in Figure 4.

Finally, the drying phase of the FFMC now works as follows. If yesterday's moisture content (m_o) turns out to be higher than E_d, a drying regime prevails and the present day's moisture content (m) is found from

$$m = E_d + (m_o - E_d) \times 10^{-k_d} \tag{9}$$

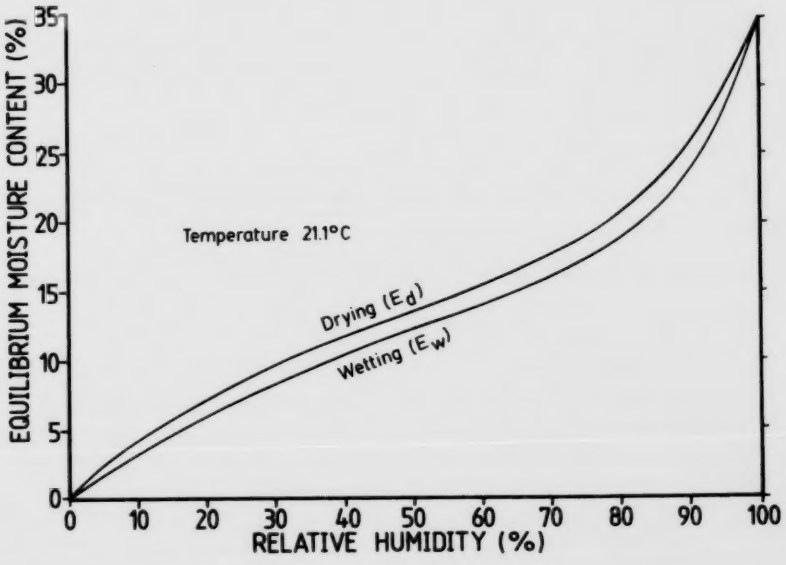


Figure 4. Isotherms of equilibrium moisture content E vs relative humidity H at 21.1°C.

If m_o turns out to be less than E_w, m is found from

$$m = E_w - (E_w - m_o) \times 10^{-k_w} \quad (10)$$

where k_d or k_w is the appropriate log drying or wetting rate obtained from Equation (5). If m_o lies between E_d and E_w, no change is assumed, and $m = m_o$.

RAINFALL PHASE

Next, the effect of rainfall on the Tracer Index was examined. The original rainfall table was analyzed for increase in moisture content per unit of rain. It was observed that this quantity decreased a) with increasing rainfall amount, and b) with increasing initial moisture content m_o. In other words, as the amount of rainfall increased, a smaller proportion of it was held by the litter; also, the higher the litter's initial moisture, the less rain it could absorb. For earlier versions of the FWI system, J.A. Turner supplied a set of three equations, for different ranges of rain amount, that matched the original rainfall table well. These operated on the code value. For the new version, a rainfall routine was required that operated on moisture content itself, rather than on code value. A new equation was therefore developed in the form

$$\triangle m/r = c\, e^{-b(250-m_o)} (1-e^{-a\,r}) \quad (11)$$

where $\triangle m$ is increase in m due to rain r, and a, b, and c are constants. The 250 represents the maximum value of moisture content in the previously described FF scale. The rainfall effectiveness $\triangle m/r$ is decreased by the first bracketed term with increasing m_o, and by the second bracketed term with increasing r.

The constant c was first set as the limit of $\triangle m/r$ as m_o and r approach zero. For the standard FFMC fuel load of 0.25 kg/m^2, the first millimetre of rain should, therefore, cause a rise of 400 percent in m. This value was reduced to 42.5 to match the original Tracer Index rainfall table and Turner's equations, implying that the maximum effectiveness of rain in wetting litter is only about 10 percent and decreases from there.

Trials with other coefficients produced the following equation:

$$\triangle m/r_f = 42.5\, e^{-100(251-m_o)} (1-e^{-6.93\,r_f}) \quad (12)$$

The 251 appears in place of 250 in order to prevent division by zero should m_o ever equal 250; r_f is net rainfall, described below in Equation 14. When converted to code values, this equation's results match the output of the previous equations within one or two points over a wide range of rain amount and initial moisture content, with a slight exception explained below.

Because the behavior of Equation 12 is slightly anomalous when both rain amount and initial moisture content are large, a corrective term was added for use at high initial moisture content. This correction equals

$$0.0015\,(m_o-150)^2 r_f^{0.5} \quad (13)$$

It is added to Equation 12 only when m_o exceeds 150, and comes into play when the resulting FFMC code value is about 5 or less.

Finally, the amount of rain to be used in Equations 12 and 13 was reduced to allow for loss in the overhead canopy. Thus

$$r_f = r_o - 0.5 \quad (14)$$

where r_f is net rain amount and r_o is observed rainfall in the open, in millimetres. In other words rainfalls of up to 0.5 mm are to be ignored for purposes of the FFMC. In dry weather, the rainfall equations are not used. The increase in moisture content due to rain is assumed to occur always before the day's drying begins.

This completes the description of the Fine Fuel Moisture Code in its new version. It is also well recognized that fine fuel moisture content undergoes a strong wavelike diurnal variation. After the fuel is moistened by rain, this diurnal wave is superimposed on the general day-to-day trend until day-to-day equilibrium has been achieved. The FFMC thus describes the afternoon state only (forecast from noon observations), and other means are required to deal with fine fuel moisture at other times of day. Muraro et al. (1969) designed such a scheme, further developed into a Diurnal FFMC Table by Van Wagner (1972b). More recently, a computerized method depending on hourly (or at least frequent) weather data around the clock has become available (Van Wagner 1977).

THE DUFF MOISTURE CODE

BACKGROUND

In Beall's (1939) supplement to the second generation of Canadian forest fire danger indexes, there appeared a subsidiary index called the Drought Index. While the Tracer Index represented usually only several days of past weather and its effect on fine fuel moisture content, the Drought Index took account of up to 25 days of weather history. Its purpose was to stratify the day-to-day fire weather according to the number of days since appreciable rain; in physical concept it could be likened to a simple reservoir in which rain accumulated additively, and which lost a constant amount for each day without rain. Although the Drought Index, unlike a real fuel, was linear in both its drying and wetting phases, it performed a useful function in the next two systems of danger rating.

When work began around 1970 on the first version of the FWI System, it was generally agreed that a subsidiary index was required that represented the moisture content of some real slow-drying forest fuel. The fuel chosen because of its universal and continuous presence in Canadian forests was the duff layer, roughly equivalent to the F–layer of soil science. An index filling this need appears in the new system as the Duff Moisture Code (DMC). It was developed after 4 years of field work, mainly in red pine and jack pine stands. The basic method was to transfer rectangles of organic matter to trays 60 × 40 cm in area set in the forest floor, and to weigh them daily. The DMC represents duff layers about 7 cm deep and 5 kg/m^2 in dry weight. Because a published description already exists (Van Wagner 1970a), only an outline of its structure is presented here.

SCALE

A scale for the DMC was designed after the manner of the U.S. Buildup Index (U.S. Forest Service 1966) on a logarithmic function of the actual moisture content that rises with dryness. The type expression is

$$P = c\,[\log (M_{max}-E) - \log (M - E)] \qquad (15)$$

where c is a scale constant, P is code value, M is moisture content, and E is the equilibrium moisture content. M_{max} was set equal to 300, and E to 20. The actual scale equation in natural logarithms for the chosen moisture limits of 300 and 20 percent was then

$$P = 244.72 - 43.43 \ln (M - 20) \qquad (16)$$

This scale is illustrated in Figure 5. The main advantage of such a scale is that it permits the addition of daily drying increments that are independent of the current value of the code.

RAINFALL PHASE

In the wetting phase of the DMC, two principles form the basis of the equations:

1) The increase in moisture content per unit of rain is inversely proportional to the amount of a rainfall.

2) The wetting effect of a rainfall decreases with increasing initial moisture content.

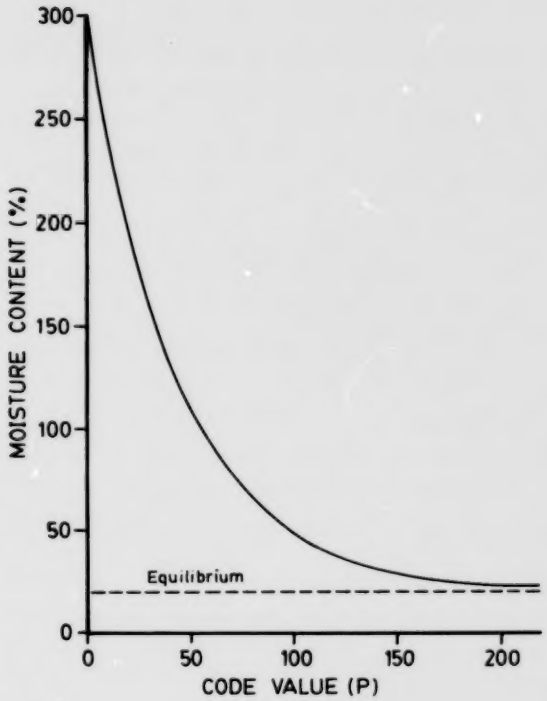


Figure 5. Graph of scale linking DMC to duff moisture content.

In other words, the duff layer retains a greater fraction of a light rainfall than a heavy one, and the wetter the duff the less rain it can absorb. Although the effect of rainfall duration was demonstrated in the original work, it was decided to omit this complication in the practical moisture code. In the DMC, the effective rain r_e is given as a function of the total rain r_o by

$$r_e = 0.92\, r_o - 1.27 \qquad , r_o > 1.5 \qquad (17)$$

where r_e is net rain amount and r_o is observed rainfall in the open. In any event, rainfalls of up to 1.5 mm are ignored for purposes of the DMC, and Equations 17 and 18 (below) are not used unless r_o exceeds that amount. The moisture content after rain (M_r) is given by

$$M_r = M_o + 1000\, r_e/(48.77 + b r_e) \qquad (18)$$

The coefficient b was first expressed as a plotted curve, which was then rendered in terms of the initial code P_o by a set of three empirical equations for different ranges of P_o:

$$b = 100/(0.5 + 0.3\, P_o) \qquad , P_o \leq 33 \qquad (19a)$$

$$b = 14 - 1.3 \ln P_o \qquad , 33 < P_o \leq 65 \qquad (19b)$$

$$b = 6.2 \ln P_o - 17.2 \qquad , P_o > 65 \qquad (19c)$$

DRYING PHASE

The drying phase of the DMC consists of two equations and a short table based on the following points:

1) Day-to-day drying in constant weather is exponential.

2) The duff layer has, for practical purposes, a constant equilibrium moisture content E of 20 percent.

3) The log drying rate K is proportional to temperature, becoming negligible at about $-1°C$.

4) The log drying rate K is proportional to the deficit in relative humidity.

5) The daylength, varying with season, has an effect roughly proportional to three less than the number of hours between sunrise and sunset.

The log drying rate K is given by

$$K = 1.894\,(T + 1.1)(100 - H)\,L_e \times 10^{-6} \qquad (20)$$

where L_e is an empirical daylength factor listed by month in Table 2. The present day's DMC is then found from

$$P = P_o \text{ (or } P_r) + 100K \qquad (21)$$

where K is multiplied by 100 to yield values matching the chosen scale.

Table 2. Daylength factor L_e in Duff Moisture Code

Month	L_e	Month	L_e
January	6.5	July	12.4
February	7.5	August	10.9
March	9.0	September	9.4
April	12.8	October	8.0
May	13.9	November	7.0
June	13.9	December	6.0

THE DROUGHT CODE

BACKGROUND

The Fine Fuel Moisture Code covers only the thin surface layer of fast-drying material, whereas the Duff Moisture Code applies to organic layers of moderate depth and dry weight. Real fire danger, however, is also affected by the state of the deeper organic layers common in many parts of Canada, by concentrations of large downed wood, and even by the availability of water in small streams and swamps. It was decided, therefore, to include a third, very slow-drying moisture index in the FWI System and to call it the Drought Code.

The Drought Code (DC) was first developed by Turner (1966) to serve as an index of the water stored in the soil rather than to follow the moisture state of a particular slow-drying forest fuel. Because soil loses moisture exponentially, such an index is quite suited to represent certain heavy fuels. Muraro and Lawson (1970) identified one such material; they established that the DC follows reasonably well the moisture variations in deep, compact duff layers on Vancouver Island. These layers are, on the average, about 18 cm deep and 25 kg/m^2 in dry weight. Deep duff layers of a similar nature under balsam fir forest at Petawawa and upland black spruce in northern Quebec have also been found to match the DC well in drying rate (Van Wagner 1974). One function of a slow-acting moisture code such as the DC is to warn of occasions when the lower layers of deep duff may be drier than the upper. Both Muraro and Lawson (1970) and Kiil[1] report field studies of this phenomenon, which results in persistent deep smoldering even though surface fire behavior may not be severe.

In its initial form, the DC was called the Stored Moisture Index (SMI) and was expressed directly in 100ths of an inch of water up to a maximum of 800 (i.e., 8 inches of water). To match the style of the DMC, the SMI was converted to a logarithmic scale rising with dryness. A brief mathematical description of the DC follows, and Turner (1972) gives a complete description.

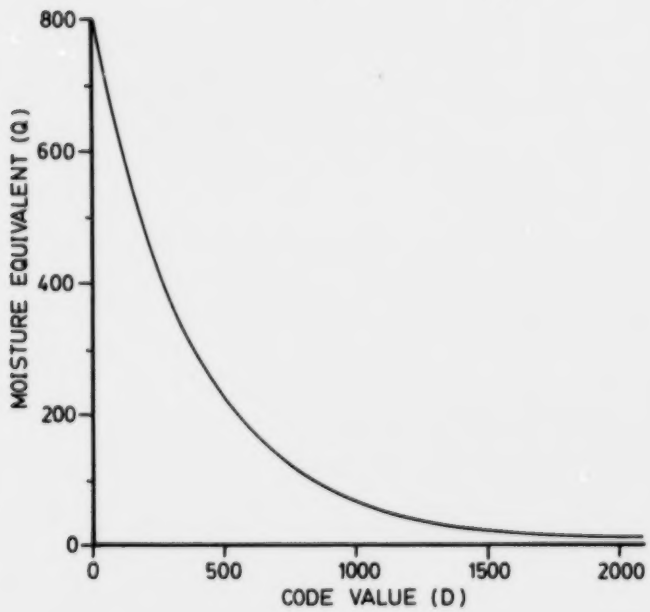


Figure 6. Graph of scale linking DC to its moisture equivalent Q.

[1]Kiil, A.D. 1970. Distribution of moisture in spruce-fir duff and its relevance to fire danger rating. Can. Forest. Serv., Northern Forest Res. Centre Internal Rep. A–34.

SCALE

The scale of the SMI (the original form of the DC) was 800 units in length, 800 representing saturation and zero representing the driest condition normally encountered. The required equation for the new logarithmic scale was analogous to the one forming the basis of the DMC. As an exponential expression of the moisture equivalent Q, the chosen scale equation is

$$D = 400 \ln (800/Q) \quad (22)$$

where D is the current DC. The constant 400 represents the maximum theoretical moisture content of the fuel represented by the DC. As in the DMC, this type of scale permits the addition of daily drying increments that are independent of the current value of the DC (Figure 6).

RAINFALL PHASE

Rainfall in the DC is first reduced to an effective rainfall r_d and then simply added to the existing moisture equivalent Q_o to give Q_r, the moisture equivalent after rain. The two equations are

$$r_d = 0.83\, r_o - 1.27 \quad , r_o > 2.8 \quad (23)$$

and $$Q_r = Q_o + 3.937 r_d \quad (24)$$

Rainfalls of up to 2.8 mm are ignored for purposes of the DC; Equations 23 and 24 are not used unless r_o exceeds that amount.

DRYING PHASE

The daily dry-weather additives to the DC actually represent potential evapotranspiration (V), which is given by an empirical equation dependent on noon temperature and season:

$$V = 0.36 (T + 2.8) + L_f \quad (25)$$

The seasonal daylength adjustment L_f is listed by month in Table 3. Because the scale length of the DC is in a sense one-half that of the original SMI (see Equation 22), the value of V is halved and added to the initial code D_o (or, in case of rain, to D_r). The present day's DC is thus found from

$$D = D_o \text{ (or } D_r) + 0.5\, V \quad (26)$$

OVERWINTERING

The timelag of the DC, 52 days in standard weather, is long enough that the amount of precipitation during winter may affect the season's starting value. In other words, the assumption that melting snow always saturates the DC fuel layer cannot be counted on. Following the procedure of Turner and Lawson (1978), the DC starting value is computed from

$$Q_s = a\, Q_f + b\, (3.94 r_w) \quad (27)$$

where Q_f is final fall moisture equivalent (from final D by Equation 22),
r_w is winter precipitation in millimetres,
Q_s is starting spring moisture equivalent, and
a and b are constants.

The value of D corresponding to Q_s may then be found by Equation 22. This procedure now constitutes an integral aspect of the DC and its computation. The values of a and b are set according to the judgment of each agency and its advisors. Experience so far is that an overwinter adjustment is almost never necessary in eastern Canada, but will be needed occasionally in certain western regions as described, for example, by Alexander (1982).

Table 3. Daylength adjustment L_f in Drought Code

Month	L_f
November to March	−1.6
April	+0.9
May	3.8
June	5.8
July	6.4
August	5.0
September	2.4
October	0.4

SCALE FOR THE FIRE WEATHER INDEX

The previous Canadian fire danger index was on a scale of 0–16, called here the D–scale. This scale, however, was not uniform across Canada, since the same weather data yielded different index values among the nine regional versions. Aside from the goal of a uniform national index, there were three other reasons for developing a new scale:

1) In some regions, the D–scale was not long enough to cover the whole possible range of fire weather.

2) A more open scale with higher values at high fire danger was desired.

3) No interpretation existed of the D–scale in terms of physical units of fire intensity.

At the same time it was decided to preserve a link between the old scale and the new, both in concept and through an actual equation.

The first step was to interpret the D–scale as some function of fire behavior, preferably frontal fire intensity in terms of rate of energy output per unit length of fire front (after Byram 1959). From the experimental fire program at Petawawa there were available some 22 documented fires in pine stands, for which the Danger Index was known and the intensity could be calculated. Some fires burned in a jack pine stand, some in a mixed red pine and white pine stand, and some in a red pine plantation. These were all plotted on semilog paper as log intensity versus D–scale Fire Danger (Figure 7), in which the D–scale is shown extended beyond its normal limit of 16. (This work and the following scale development were based on the English–unit intensity in British Thermal Units per second–foot; however, an SI unit scale in kilowatts per metre is added to Figure 7 for comparison). The resultant grouping gave reasonable cause for assuming the D–scale to be a logarithmic function of intensity, according to the broken line in Figure 7.

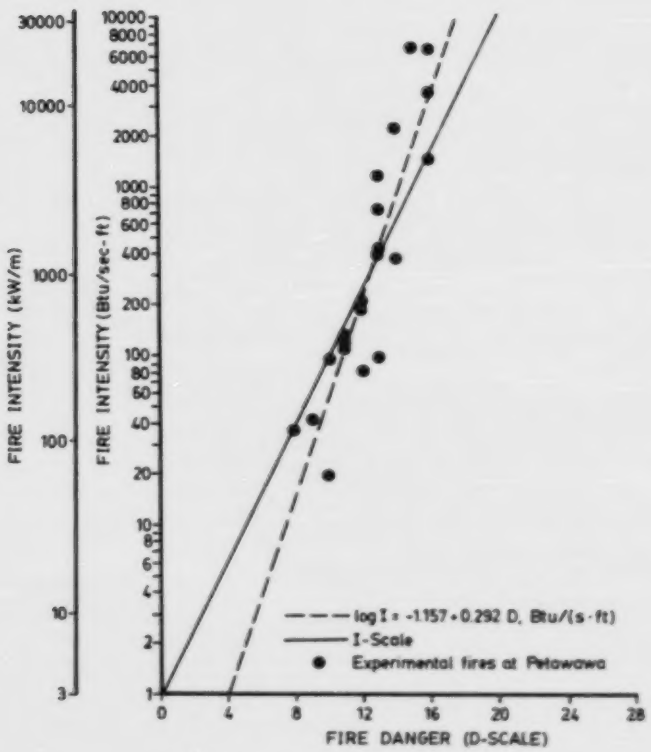


Figure 7. Graph of I–scale and the relation between the intensity of experimental fires and D–scale.

A modified line was now required to represent a generalized intensity interpretation of the D–scale, on two grounds:

1) The three most intense fires in Figure 7 were in the red pine plantation, judged to be more flammable than the so-called standard fuel type; therefore the upper portion of the line was shifted right.

2) The zero in Canadian fire danger rating is traditionally a condition wet enough that fires will not start and spread in even the most flammable fuel types; therefore the required line should pass through the origin of the D–scale, and the lower portion of the line shifted to the left.

The solid line in Figure 7, crossing the broken line at moderate intensity and reaching 1 Btu/(s–ft) at D–scale zero, was named the I–scale, and formed the link between the old and new systems of danger rating. Another desirable result of this adjustment is that the proportion of zeros can be kept below some reasonable level, say 20 percent of days, at locations with average fire climate in Canada.

Furthermore, it was decided to leave the new scale open at the top. This was in keeping with its concept as a function of frontal fire intensity, and not as a percentage or fraction of some imagined worst possible state. As a result, no matter how high the FWI should rise, it can rise still higher if the fire weather becomes more severe. There is no artificial upper limit such as existed in the old system.

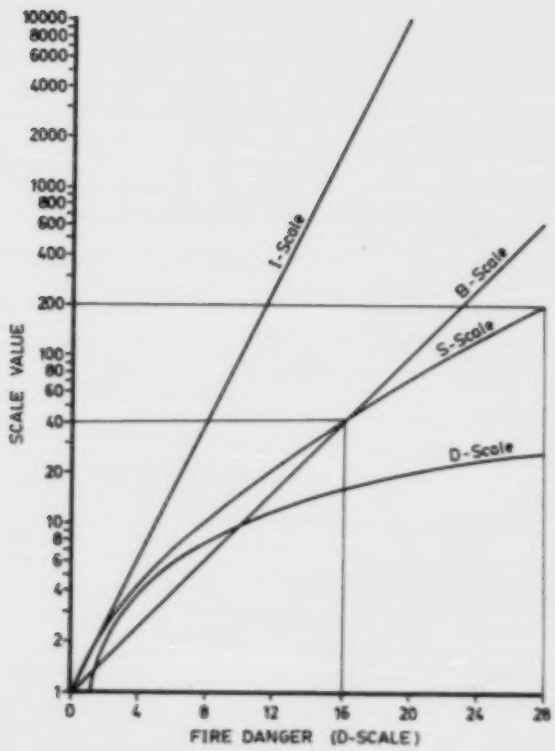


Figure 8. Four danger scales (I, B, S, and D) all graphed against D–scale, showing the two design points for the S–scale.

Since the I–scale values (Btu/[s–ft]) were judged too large and inconvenient for direct use, a reduced function of this scale was required. The first function chosen was the simple square root of the I–scale, called the B–scale, and the remaining equations required to calculate the FWI were worked out on this B–scale. Later it was observed that the B–scale had two drawbacks. It had to extend beyond the limit of 16 on the D–scale, into a region for which no reliable fire intensity estimates were available. In this upper region, the B–scale gave values of several hundred, somehow out of proportion to the lower part of the range. Also, below 10 the B–scale actually has lower values than the D–scale, and this was hardly in keeping with the concept of a more open scale. Another scale was developed called the S–scale, designed to equal 40 at D–scale 16 and 200 at D–scale 28. It yields values higher than the D–scale throughout its whole range; in practice, a level of 100 will occasionally be exceeded in Canada, but 200 will almost certainly never be reached. The FWI was recast on this scale, whose relations to the I–scale, B–scale, and D–scale can be seen in Figure 8.

Equations for these various scales are

$$I = 10^{0.2D} = e^{0.461D} \tag{28}$$

$$B = 10^{0.1D} = I^{0.5} = e^{0.230D} \tag{29}$$

$$\begin{aligned} \ln S &= 0.614\, D^{0.647} = 1.587\, (\ln B)^{0.647} \\ &= 1.013\, (\ln I)^{0.647} \end{aligned} \tag{30}$$

The above equations are all for I–scale in terms of British Thermal Units per second–foot. A pair of equations for conversion between S–scale and I–scale when fire intensity is in kilowatts per metre, the accepted present-day units, is given below.

$$\ln S = 1.013\, [\ln(0.289\, I)]^{0.647} \tag{31}$$

$$\ln (0.289\, I) = 0.980\, (\ln S)^{1.546} \tag{32}$$

Equations 28 to 32 constitute a formal but somewhat artificial link between the old and new danger scales and fire intensity. The intensity link in particular should be recalibrated specifically to fit any fuel type for which enough fire behavior data are available.

THE INITIAL SPREAD INDEX

BACKGROUND

It would have been easy to take the three moisture codes, together with wind (for its direct effect on the fire), and process them in one long equation yielding the day's FWI. This operation has been divided into three steps for two reasons: first, it would be impractical to design a single table for manual determination of the FWI from these four quantities and, second, the intermediate components might themselves be valuable for presenting a full picture of the daily fire weather.

The first of the two intermediate components is the Initial Spread Index (ISI), a combination of the effects of wind speed and fine fuel moisture content on fire spread. Its first function was to be an intermediate in the determination of the FWI, and it had to be designed with this principal end in mind. At the same time it was called a "spread index" in the belief that a fire's rate of spread is mainly dependent on wind speed and fine fuel moisture content. In addition, because it is undoubtedly true that the rate of spread of an established fire can be influenced by the amount of total available fuel, the name was modified by prefixing "initial." In other words, the name refers not so much to the behavior of a fire during its early life just after ignition, but rather to the basic rate at which a fire will spread when the fine fuel is dry but further drying in depth is not well advanced. To develop the ISI, functions for the effects of wind and fine fuel moisture on fire spread were designed separately, then multiplied together, and finally adjusted to the chosen scale.

THE WIND FUNCTION

After work began on the problem of the wind function, it soon became apparent that there exists as yet no general theory to account for the effect of wind on forest fires throughout the whole range of intensity. The choice of a wind function thus became a matter of judgment in which various kinds of evidence were examined, including the wind effects in the Australian, American, and former Canadian danger systems, several laboratory studies, and the set of experimental jack pine fires

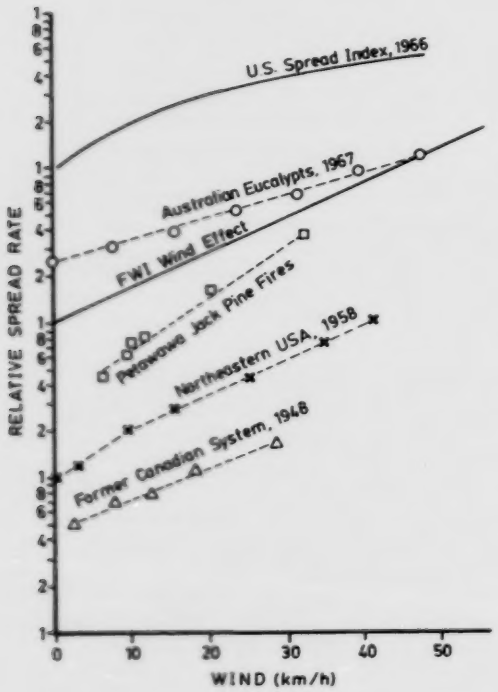


Figure 9. Effect of wind speed on relative spread rate in the ISI, along with wind effects from five sources. (Shape and slope of curves is relevant — their relative position is not).

at Petawawa. Some of these were graphed and described by Simard[2], and a few are shown in Figure 9, plotted on semilog paper as spread rate (or index) versus wind speed. These include a curve for Australian eucalypt fires (McArthur 1967), a curve from the U.S. Spread Index based on Nelson's (1964) tables, a curve for fires in the northeastern United States (U.S. Forest Service 1958), and a curve from Beall's (1948) Canadian tables. Index values in the former Canadian system were converted to B–scale before plotting. It was apparent in both Simard's treatment and Figure 9 that most of the curves were roughly exponential.

Before a choice of wind function could be made, it was necessary to define the type of exposure on which to base the wind scale. The wind-measurement method used in the systems shown in Figure 9 were examined, as well as data compiled by Simard (1971) comparing airport winds with winds at fire weather stations. The weight of evidence pointed to the international standard 10-metre open wind, and this was adopted. The winds measured 1.2 m above ground in the forest during the Petawawa jack pine fires were multiplied by 5 for purposes of Figure 9. (This factor was obtained from a study of local wind speeds at different heights above ground.)

The chosen wind effect, f(W), is a simple exponential

$$f(W) = e^{0.05039W} \tag{33}$$

where W is 10-metre open-wind speed in kilometres per hour. This function (see Figure 9) doubles the ISI for every 14 km/h increase in wind speed. It is fairly close to several published effects of wind on forest fire and matches fairly well the local experimental field evidence. Nevertheless, it is essentially empirical, and at very high wind speeds its validity is uncertain.

THE FINE FUEL MOISTURE FUNCTION

The function for fine fuel moisture (FFM) in the ISI is based on an analysis of FFM effect in the former fire danger system. As with wind, it was decided after due examination of the literature that no acceptable general theory of FFM effect on fire spread yet exists. In contrast to the case of wind, however, empirical data have been collected over several decades by Canadian Forestry Service researchers on the effect of FFM on test fire behavior, all of which are embodied in the former system.

To derive an FFM function, f(F), summer danger indexes in all nine versions of the old system were plotted against FFM content at several levels of the old Drought Index. The average curve at a moderate drought level (15) was then plotted as B–scale index against FFM content and modified slightly after consultation. The resulting function is a fairly straight descending line on semilog paper, four times as strong at 6 percent as at 16 percent FFM content, and flattening out gradually above 16 percent. It is shown graphed in Figure 10, with an Australian curve from McArthur (1967), an American curve from U.S. Forest Service (1966), and a curve from the previous Canadian system (Forestry Branch 1957). The empirical equation chosen as a reasonable fit is

$$f(F) = (91.9\, e^{-0.1386m})\,[1 + m^{5.31}/(4.93 \times 10^7)] \tag{34}$$

where m is fine fuel moisture content in percent, determined by Equation 2b. The second term on the right side of Equation 34 has been slightly modified from its original form in order to maintain compatibility of the ISI with the FFMC, whose changes were described earlier.

[2]Simard, A.J. 1968. Relative spread index. Progr. Rep. 2. Can. Dep. For. Rural Develop., Forest Fire Res. Inst., Ottawa.

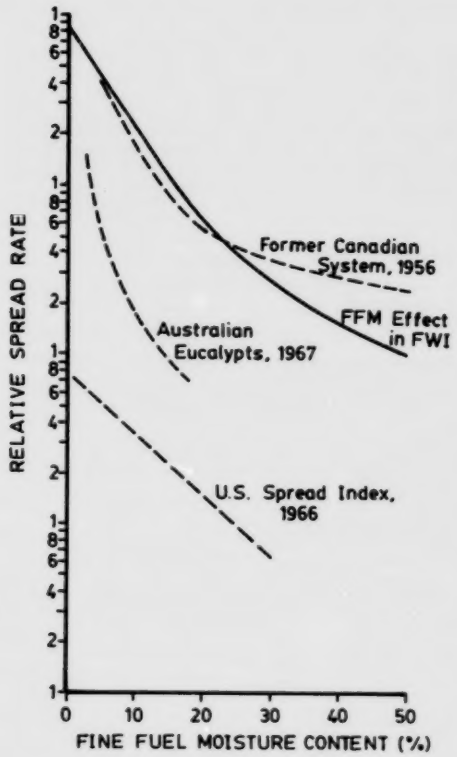


Figure 10. Effect of fine fuel moisture (FFM) on relative spread rate in the ISI, along with FFM effects from three sources. (Shape and slope of curves is relevant — their relative position is not).

THE ISI EQUATION

The ISI is merely the product of functions of wind and fine fuel moisture, together with a reference constant 0.0208. This constant was determined at a later stage, and was designed to make the B–scale FWI equal to 40 for an arbitrary set of conditions at which the British Columbia Coast Index in the former system equalled 16. These conditions were:

Wind speed — 13 km/h

Fine fuel moisture content — 6 percent

Old Drought Index — 25

The constant itself was multiplied by 10 to provide a convenient range of numerical values for the ISI. The equation is, then,

$$R = 0.208\, f(W)\, f(F) \qquad (35)$$

where R is Initial Spread Index.

THE BUILDUP INDEX

The second of the two intermediates that lead directly to the FWI is the Buildup Index (BUI), formerly the Adjusted Duff Moisture Code; the BUI is a combination of the Duff Moisture Code (DMC) and the Drought Code (DC). Once it was decided to introduce the slow-acting DC into the new system, a method was sought that would give a limited, variable weight to the DC, reserving the main effect for the DMC. In particular, when the DMC is near zero, the DC should not affect the daily fire danger no matter how high its level. The function best meeting these requirements is the harmonic mean.

Before the DMC and DC could be combined, their scales had to be rendered equivalent in terms of average rate of rise in dry weather. Since the daily additives in each code respond to noon weather in different ways, this could only be done empirically. Accordingly, three seasons' daily additives of each code were averaged, using nonrainy days in June, July, and August. For Petawawa weather, the average daily increase in the DC turned out to be 2.5 times that in the DMC, and this ratio was adopted. Before the harmonic mean (i.e., the BUI) can be calculated, the DC must be multiplied by 0.4.

The relative behavior of DMC and the reduced DC is generally as follows. In spring, when calculation begins, the two codes rise together until the first rain. Because the DMC is reduced more by rain, the DC will remain comparatively higher after each rainfall. The DMC may fluctuate between high and low levels several times during a fire season, but the DC tends to rise gradually throughout the warm part of the season and to fall when cool weather starts. Thus the reduced DC is almost always higher then the DMC. By the nature of the harmonic mean, the smaller DMC accordingly receives the greater weight.

The harmonic mean of two variables a and b is $2ab/(a+b)$. When the DMC and the reduced DC are combined in this way, the BUI is given by

$$U = 0.8\,PD/(P + 0.4D) \qquad , P \leq 0.4D \qquad (36)$$

where U is BUI, P is DMC, and D is DC. This BUI has the following properties:

1) When the DMC is zero, the BUI is also zero no matter what the value of the DC.

2) The proportional weighting given to the DC is variable, increasing as the ratio of DMC to DC rises toward 1.

3) Except when the DMC is zero, the BUI is always greater than, but never more than double, the DMC alone.

4) After each rain the BUI rises at a faster rate than the DMC. The higher the DC with respect to the DMC, the faster does the BUI regain a given previous value.

5) Because the DC tends to increase over a whole summer, a slight seasonal effect is imparted to the BUI. That is, a given run of daily weather generally results in a higher BUI in autumn than in spring.

THE DUFF MOISTURE FUNCTION

To give the Fire Weather Index meaning as a measure of fire intensity, factors are required for both rate of spread and fuel consumption. The ISI clearly represents rate of spread, but BUI is simply a blend of two fuel moisture codes and retains their basic form, a logarithmic function of moisture content. A function was needed, therefore, to transform the BUI into a measure of fuel weight consumed. It was derived in the following manner.

Once again, this time for lack of a general theory on how the proportion of fuel available for combustion increases with dryness, the function was drawn mainly from an analysis of the analogous effect in the former danger system. Summer danger indexes in all nine versions of the former system were graphed against the old Drought Index at several levels of fine fuel moisture content, all values being first transformed to the scales of the new system. The old D–scale index was converted to B–scale by the appropriate scale equation, and the old Drought Index (DRI) to DMC according to the relation

$$DMC = 13.0 + 2.92\ DRI \qquad (37)$$

(This conversion was developed from a graph of DMC against DRI by using 3 years' local data for June, July, and August. Although the range of DMC values for each value of DRI was wide owing to the differences in index structure, the average DMCs fell on a reasonably straight line.)

The transformed graphs of old danger index against old drought index turned out to be fairly straight lines tending to converge near zero. For each line the ratio of B–scale indexes at DRI 25 and 5 (DMC 86 and 28) was calculated, the average being 2.5. The value of the desired duff moisture function was arbitrarily set equal to 10 at DMC 28, and consequently to 25 at DMC 86. The function was also given a small value at zero DMC, on grounds of the following reasoning.

The DMC and DC themselves refer only to two classes of slow-drying fuel. However, the function representing them in the FWI equation, being really a fuel-consumption factor, must account for all fuel burned, fast-drying as well as slow-drying. The small function value at zero DMC, therefore, represents the small constant weight of fine fuel assumed to burn in any fire that spreads at all. After some trial, this small value was set at 2.

The three points now available (at DMC 0, 28, and 86) formed a gentle curve flattening as it rose, and were matched with the function $0.626P^{0.0809} + 2$.

The result had one important limitation; it was based on the effect of the old Drought Index, which had a scale length of only 25 days without appreciable rain — say 85 on the DMC scale. Since the new danger system must handle rainless periods much longer than this, some justification for extrapolation was needed. In the original version of the FWI, this was provided by a theory to account for the increased amount of duff available as fuel as the moisture content decreases. A brief description is given here and a detailed account appears elsewhere (Van Wagner 1972c).

Suppose that fire spreads by preheating and igniting the fine fuel layer only — say 0.25 kg/m^2. Any duff that contributes directly to frontal intensity must be ignited, therefore, and burned during passage of the fire front. To accomplish this, the fire must transfer heat downward to drive off moisture and raise the duff to ignition temperature. If the amount of energy transferred downward within the fire front can be estimated, as well as the amount of energy required to raise unit weight of moist duff to ignition temperature, a balance can be struck that will yield the weight of duff available as fuel for the fire-front. Several assumptions were made, reducing the theory to the simplest possible terms. A curve was then drawn that, as it turned out, matched the function already derived very well in a relative sense over the DMC range at least up to 200 (Figure 11). This theory, although incompletely secure, did afford a rational basis for the desired extrapolation of the duff moisture function, called f(D). Finally, although the function was derived in terms of the DMC, it is the BUI that is used in the final equation. The equation for the original f(D) was, then

$$f(D) = 0.626U^{0.809} + 2 \qquad (38a)$$

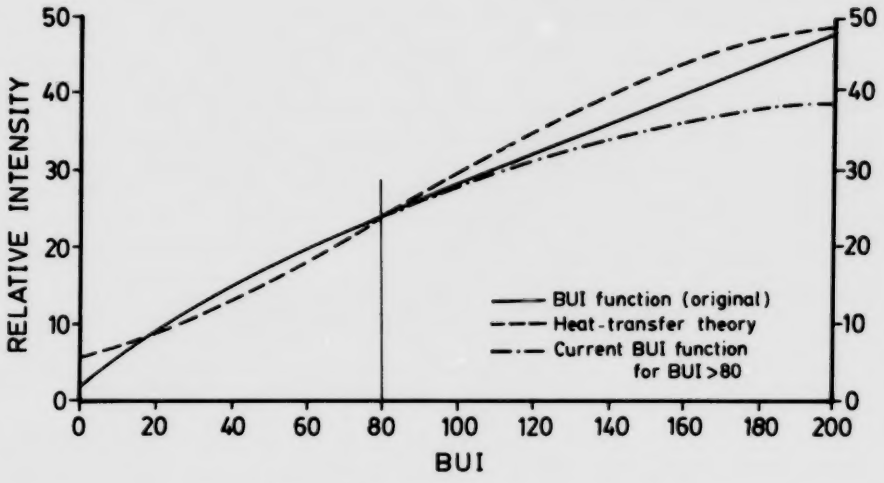


Figure 11. Effect of BUI on relative intensity in the FWI, showing new function above BUI 80, plus curve based on heat-transfer theory.

Although the theoretical curve in Figure 11 flattens off to a maximum value at high BUI, the chosen f(D), Equation 38a, did not, mainly because the theoretical form could not easily be adapted to the desired curve shape at low BUI. Subsequently, it was realized that Equation 38a allows the FWI to increase indefinitely with rising BUI, a condition not in keeping with the principle that there is a limit to the amount of fuel that can be engaged in the production of actual frontal intensity. A new equation was designed, therefore, to come into play at BUI 80 and eventually to level off at f(D) = 40. The FWI now reaches 90 percent of its potential value at BUI 160 and even an infinite BUI will yield no more than a further 10 percent increase. Analysis of the duff consumption data of Van Wagner (1972a) suggests that an f(D) of 40 is equivalent to about 2.5 kg/m^2 of duff consumption. Larger amounts, if consumed, are assumed to smolder behind the main fire front. Equation 38a is now used for BUI values up to 80; beyond that, f(D) is given by

$$f(D) = 1000/(25 + 108.64\, e^{-0.023U}) \qquad , U > 80 \qquad (38b)$$

This equation levels off, for considerations of scale, somewhat below the maximum of the theoretical curve, and is shown also in Figure 11.

THE FWI EQUATION

The functions required to calculate the FWI are now all at hand. The duff moisture function is given by Equations 38a and 38b. The reference constant, whose derivation was covered in the section describing the ISI, is already an integral part of the ISI. That constant was multiplied by 10 for convenience and, therefore, the ISI's value must be readjusted by the factor 0.1. The B–scale FWI is then given by

$$B = 0.1\, R\, f(D) \qquad (39)$$

The final S–scale FWI is then found from

$$\ln S = 2.72\, (0.434 \ln B)^{0.647} \qquad (40)$$

This last equation has one restriction. When B is less than 1, its logarithm is negative and cannot be taken to a fractional power. In such cases, S is simply set equal to B. Finally, it should be noted that this equation[3] yields smaller and smaller values as the moisture codes decrease, but never a true zero. For general use, the FWI and its various system components are usually rounded to the nearest whole number; any FWI value of less than 0.5 will thus be reported as zero.

THE DAILY SEVERITY RATING

An optional additional component of the FWI System is the Daily Severity Rating (DSR). Severity rating was originally conceived by Williams (1959) to provide a measure of control difficulty in terms of the former fire danger index. It was recognized that the kind of scale appropriate for fire danger rating was not necessarily in direct proportion to the work required to suppress a fire. This nonlinearity with respect to control effort was pronounced in the former index and is still considerable in the FWI. Williams' (1959) formula was therefore adapted to fit the FWI by Van Wagner (1970b). The DSR is computed directly from the FWI by the equation

$$DSR = 0.0272S^{1.77} \quad (41)$$

The obvious effect is to weight the FWI sharply as it rises, in a manner deemed to reflect control difficulty in more direct proportion. The FWI itself is therefore not considered suitable for averaging and should be used as its single daily value only. Any averaging, whether spatially over a number of stations on a given day or at a single station over any period of time, is better accomplished through the DSR.

The DSR averaged for a whole fire season is termed the Seasonal Severity Rating (SSR), which can be used as an objective measure of fire weather from season to season, or fire climate from region to region. But it is, in itself, an incomplete measure of seasonal fire activity because the latter is also dependent on the ignition pattern and the control resources available.

[3]This is the standard equation to be used in calculating the FWI. It is not exactly identical to equation 30, which was calculated later at full precision.

THE FIRE WEATHER INDEX SYSTEM IN USE

CALCULATION

The codes and indexes of the FWI System may be determined either by computer or from tables. The basic form of the system is the standard set of equations. Most of these have been used in the present publication in explaining and illustrating the system's structure. The complete set is listed in Van Wagner and Pickett (1985), and includes several others designed to improve internal consistency in minor ways. The published set of tables (Canadian Forestry Service 1984) was derived from these equations.

Several historical computer programs have figured in the development of the FWI System and its use. The first was by Nikleva and Parent (1971). Others were designed by Simard (1970b), Engisch and Walker (1971), Kean (1975), and Kourtz (1980). The present official program (included in Van Wagner and Pickett 1985) processes the present equations to give the purest possible mathematical output, with no artificial constraints other than those required by the empirical nature of some of the equations. Although it is arranged to handle one station's weather data one season at a time, its mathematical routines serve as a standard of comparison, and may be incorporated as blocks into operational daily programs serving any number of stations.

A perennial problem in computation deserves mention. The traditional means of working out fire danger indexes in Canada in years past was by a set of manual tables; these by themselves formerly constituted the standard. The FWI System, however, is based on equations that can only be processed conveniently by computer. It is, of course, impossible to design a set of tables that will match the pure mathematical computer output all of the time. Great pains have been taken to make the tables as accurate as possible and to minimize bias in the average table output, but day-to-day error will occur to some degree in all codes and indexes. Most agencies now compute the FWI System output centrally and redistribute it to the individual stations. However, the tables are still in widespread use locally for quick answers as soon as weather observations are available. An agency then has two choices. It can adopt the mathematical output as standard, instructing any station that keeps a table record to adjust it occasionally to match the computer record. Or it can place the tables themselves in the computer, and adopt the table output as standard. Of course, this choice will be a matter of policy. Nevertheless, it is understood that whenever critical comparison or development is required the equation output is the true standard.

Since the FWI System depends only on weather readings and the date (by month), its output can just as easily be calculated from forecast weather to yield a forecast of fire danger. In cooperation with the Atmospheric Environment Service, most forest fire agencies now issue such forecasts up to 24 hours in advance of the standard noon determinations. Paul (1970), Pouliot (1974), and Nikleva (1975) have described operational procedures.

INTERPRETATION

The FWI was originally conceived to represent frontal fire intensity as defined by Byram (1959) in the equation

$$I = HWR \qquad (42)$$

where, in compatible units, H is heat of combustion, W is weight of fuel consumed per unit area, R is rate of advance, and I is energy output rate per unit length of fire front.

Accordingly, the FWI scale was derived from a graph of the intensities of some experimental fires over old fire danger (Figure 7). Further, the ISI and BUI were designed to represent the factors R and W respectively in Byram's equation. The heat of combustion H is known to vary somewhat with fuel species and moisture content, but for practical purposes was considered constant. It can therefore be thought of as embedded in the reference constant (see Equation 35).

Of course, owing to the distortion involved in the design of the S–scale, the FWI is not a direct proportional representation of frontal intensity. In fact another interpretation is possible. As shown in Figure 8, the S–scale is in a rough sense not unlike the square root of the I–scale, which represents fire intensity. But it is known (Byram 1959) that the flame length of surface fires is also approximately proportional to the square root of intensity. Thus, the FWI could in turn be pictured as roughly proportional to flame length, a useful visual measure of fire behavior.

Because the FWI combines so many effects, the same index value can be reached by many different weather combinations and histories. For example, any one of the three fuel moisture codes may be relatively high or low in opposition to the other two. First, two or three good days' drying after heavy rain will produce a high FFMC while the DMC remains low. Second, muggy weather or light rain after a long dry period will produce a low FFMC while the DMC remains high. Third, the DC may rise or fall gradually while the other two codes fluctuate many times. As a result of this interplay, for instance, muggy calm weather after a considerably dry period will yield a moderate FWI. A sudden dry windy day will then cause the FWI to rise dramatically. The FWI is, in fact, considerably more variable from day to day than the old danger index on account of its stronger (but more realistic) wind effect.

All these considerations point to the impossibility of communicating a complete picture of daily fire danger in a single number. The other components of the FWI System are needed for full interpretation of the fire weather. The System can be pictured as a pyramid with the FWI at the top, and successively more components at each lower level:

First level — the FWI alone, with all effects combined as well a possible in a single number.

Second level — the ISI and BUI quoted separately, providing direct information on both spread rate and fuel consumption.

Third level — the FFMC, DMC, DC, and wind speed, all quoted separately, indicating the respective influences of surface dryness and wind on potential spread rate, and of medium and long-term dryness on potential fuel consumption.

A still lower level on such a pyramid might be the individual weather elements themselves plus, perhaps, the number of days since rain. But it is precisely because it is impossible to make sense out of such primary weather information that fire danger rating systems exist. The FWI System integrates weather effects, past and present, to yield far better measures of burning conditions and fire behavior potential than can be deduced from a simple collection of weather observations. The FWI alone is a suitable index for general public information. The ISI and BUI quoted separately are particularly recommended for general fire management usage, while the FFMC, DMC, and DC enter the picture for various special purposes. Wind speed is the primary weather factor of most direct current interest. Lawson (1972) has written an interpretation guide to the FWI System; it is aimed particularly at British Columbia but is generally applicable everywhere. He has also (Lawson 1977) produced a slide-tape presentation useful in training exercises.

CALIBRATION

No sooner was the FWI System put into practice throughout Canada than the question of how well its components would relate to various aspects of forest fire became of great interest. By calibration is meant the empirical correlations of system components with statistics of fire occurrence and fire size, rather than the prediction of individual fire behavior. Apart from many informal tests, formal large-scale studies have been published on the system's performance in Ontario, Alberta, and British Columbia. Stocks (1971), Turner (1973), Stocks (1974), and Kiil et al. (1977) have all analyzed several years' data from many stations. Their analyses show strong trends of fire activity with increasing severity of fire weather as portrayed by the FWI System's codes and indexes. Some principles that emerge from all these results are:

1) Fire occurrence is best related to the FFMC, the measure of fine surface fuel moisture content.

2) Fire area is best related to the ISI, which combines wind and fine fuel moisture, the two factors most responsible for fire spread.

3) Other system components may show good correlation with features of fire activity, depending on their information content. Thus, the FWI is a good indicator of all kinds of fire activity because it combines all factors in one number.

4) The BUI is a fair indicator of fire activity simply because dryness in depth contributes substantially to fire behavior. It reinforces any primary indicator.

5) Certain correlations may appear unfavorable, but this merely confirms that proper interpretation of any component is necessary. Thus, fire size may correlate negatively with the DC. If so, it will be because the DC rises slowly over the whole spring and summer, and will not reflect the common tendency for the most severe fire weather to occur early in the season. Use of the DC as a secondary rather than primary variable should correct this apparent anomaly.

Harrington et al. (1983) carried out a major study of how burned area in Canada relates to the FWI System, using weather data from 41 stations throughout Canada over the period 1953–1980. The best available burned area information was in the form of monthly totals by province and territory. The best linear correlations were with the DMC and the Daily Severity Rating (DSR); however, R^2 values were not particularly high. The probable reason is that fire danger and fire activity can vary considerably during a given month, and throughout a given province, so that monthly averages (or even extreme values) of any system component may bear a weak relation to the monthly burned area. The DMC performed best in this study probably because its timelag best matches the kind of weather trend necessary to produce good burning conditions on a monthly basis.

In all calibration work, the results are confounded by other factors, especially by variation in the number of fire-starting agents abroad in different kinds of weather, by the tendency of fire control effort to vary with degree of fire danger, and by the differences in fire control policy with latitude in certain jurisdictions. Such results will always require interpretation. Nevertheless, the ability of the FWI System to distinguish strongly the different degrees and aspects of fire danger has been well demonstrated.

Ultimately, the most desirable calibration of any fire danger index is in terms of the control effort needed per unit of fire perimeter. There is as yet no sound theory to link control effort with pertinent parameters of fire behavior, and the increasing variety of attack methods makes this a difficult problem indeed.

DANGER CLASSES

It is customary in fire danger rating to quote a danger class as well as or in place of an index number, especially for the general public. Although the FWI scale is uniform throughout Canada, the range of fire weather certainly is not. It makes sense, therefore, for each major jurisdiction to devise its own danger class system, assigning ranges in the FWI number scale to fit the regional pattern of fire weather. The following danger classes are in use in Canada: Very Low, Low, Moderate, High, Very High, and Extreme. Individual agencies generally use four or five of these six.

To develop a rational class breakdown, S.J. Muraro of the Pacific Forest Research Centre suggested the following procedure. First, compile a historical sample of FWIs over a number of seasons. Second, decide how many Extreme days should be allowed each season on the average, and set the lower limit of the Extreme class. Third, arrange the other classes on a geometric progression in terms of the I–scale, using a constant ratio of I–scale value from class to class. Finally, convert the I–scale values back to S–scale FWIs.

For example, suppose that FWI 30 has been chosen as the lower limit of Extreme. By Equation 32, the I–scale equivalent is 2309. The required constant ratio between classes (using all six) will then be the fifth root of 2309, or 4.706. Dividing 2309 successively by this number yields the lower limits of the other five classes. These are then converted back to S–scale FWIs by Equation 31, producing the following class ranges.

Danger class	I–scale lower limit	FWI range
Extreme	2309	30 +
Very High	491	17 – 29
High	104	9 – 16
Moderate	22	5 – 8
Low	4.7	2 – 4
Very Low	1.0	0 – 1

This mathematical procedure implies that the lower limit of the lowest class is 1, not 0. The zero value may then be added to its range to complete the picture.

This scheme provides a class structure that bears a progressive relationship to frontal fire intensity or flame length as portrayed by the FWI. Alternately, the FWI scale may simply be divided to provide some predetermined proportion of days in each class.

Simard and Valenzuela (1972) compiled distributions of fire weather and FWI System components for 364 individual stations across Canada, plus regional and provincial averages. Their data show that the severity of fire weather increases steadily from east to west across Canada, except that British Columbia includes within its borders both the wettest and driest forested areas in the nation. Furthermore, Simard (1973) incorporated these regional differences into a map of Canada that graphically portrays all this in the clearest possible way. A common fire danger system whose numerical values are constant with respect to weather but can be arranged in classes to suit the regional average weather is well suited to this national pattern.

LATITUDE

Latitude, along with time of year, influences the effective daylength and thereby the amount of drying that can be accomplished in any one day. The FWI System samples weather at one moment only, at noon LST, and the weather observations themselves tell nothing about daylength. The DMC and DC incorporate a daylength factor that changes month by month, but this trend can be valid, strictly speaking, at one latitude only. The FFMC incorporates no allowance for daylength. The effective range of latitude within Canada's forest is over 20°, and whether or not the FWI System should take this variation into account is a fair question. Some tests are described below.

Consider first the FFMC. Some average June hourly weather data from five stations at latitudes from 48° to 66°N were processed by the hourly FFMC computation described by Van Wagner (1977). The 1600 h FFMCs obtained by this method were compared with the standard FFMC worked from the noon observations; this latter presumably predicts the 1600 h actual value. The discrepancies, computed as 1600-hour value minus standard value, ranged from 1.1 at 48°N to 2.5 at 66°N, on base FFMCs in the high 80s. The correction, if it were desired, would be to progressively delay the standard observation time from 1200 h at lower latitudes to about 1400 h at higher latitudes. This is because the time of the maximum temperature and minimum RH in high summer is progressively later as latitude increases. However, the discrepancies were not judged serious enough to warrant officially recommending such revised procedures. The FFMC, in other words, measures the peak flammability condition reasonably well at all latitudes. Its diurnal range, however, does decrease markedly with latitude in high summer, meaning that fine fuel remains flammable for a longer proportion of the day as one proceeds north.

To test the DMC, theoretical daylength factors were computed for three latitudes 45°, 55°, and 65°N, and used to compute modified DMCs for the weather in a fairly dry season (actually 1967 at Lac la Biche). In comparison with the standard DMC, the output is tabulated below, based on six months, May to October.

	45°N	55°N	65°N	Standard
Season average	34.5	32.4	30.0	31.9
Maximum value	85	83	78	88

The standard version does not fit quite smoothly with the three special versions because its daylength factors were worked out empirically. Nevertheless, it represents the average case reasonably well. Several such tests were carried out, and the differences were again not judged serious enough to warrant supplying special DMCs for different latitudes.

The DC was tested in an analogous manner using the same season's weather data. The additive nature of the daylength adjustment in the DC produces higher differences than obtained with the DMC, especially toward the end of the season. The output of the three theoretical versions is tabulated with the standard DC below, again based on the six months from May to October.

	45°N	55°N	65°N	Standard
Season average	312	302	274	293
Maximum value	523	497	436	495

Again, the standard version was representative, and these variations were not judged great enough to warrant special DCs for different latitudes.

The three tests described above were computational only. True definitive testing for latitude effect would need field data, which are not yet available in sufficient quantity. In any event, because all three moisture codes are consistent with weather and its effect on regional fuels at any particular latitude, the problem of comparison among widely different latitudes will probably never become serious.

CONCLUSION

Because it was built up to represent fire behavior in a generalized standard fuel type, the FWI System will obviously have different meanings in different forest or fuel types. The initial interest was mainly in logging slash of different types (Muraro 1971, Quintilio 1972, Stocks 1972), but data linking spread rate with the FWI System in various forest and vegetation types has accumulated steadily. In fact the FWI System is just part of the larger Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS), which now includes the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System, designed to provide quantitative estimates of fire behavior in particular fuel types. An interim version of this latter (Alexander et al. 1984) provides equations for predicting rate of spread in 14 vegetation and slash fuel types throughout Canada, as well as topographical adjustments and fire growth. It is on this line of work that further research and development will be concentrated in future.

It is apparent by now what "fire danger" in the Canadian context includes and what it does not. The CFFDRS incorporates the effects of weather (past and present), season, fuel moisture content, topography (for its effects on fine fuel moisture and on fire behavior) and fuel type on the rate of spread and energy output rate of forest fires. It does not (at least not yet) include the risk of fire as dependent on the presence of fire-starting agents, the effects of topography on access, or the general "difficulty of control" with respect to particular fire-fighting tactics. These latter are deemed to be part of some larger field, namely fire management in general.

The philosophy behind the development of the FWI System and the larger CFFDRS deserves a few final remarks. Throughout the nearly 60 years of work leading to the current system, the required information has been gathered in one or more of four different ways:

— by random field sampling,

— by controlled field experiment,

— by laboratory experiment, or

— by physics and mathematics.

The final development has always been based on data or information from two or more of these sources. Especially, the final analysis has always been in terms of the empirical field experience. Theory and laboratory results have been used to plan and analyze the field experiments but never to supplant them. The approach has thus been decidedly deductive rather than inductive throughout, and the success of the system may be attributed to this strategy.

Nevertheless, all who took part in developing the Fire Weather Index System well realize that changes may become desirable from time to time. The first requirement of a fire danger rating system is that it represent nature. The second is that the information produced be in a form useful to the fire control agencies. It would be presumptuous to assume that the system described here is the last word in either of these ways. As research progresses, some of the concepts used here may become obsolete and, as fire control practices change, so may the information on fire weather and behavior desired by the agencies. Therefore it is fully expected that, in keeping with the philosophy established by J.G. Wright and H.W. Beall in the early years, this fire danger rating system will in the future continue to evolve in response to the needs of forest fire management throughout Canada.

REFERENCES

Alexander, M.E. 1982. Calculating spring Drought Code starting values in the Prairie Provinces and Northwest Territories. Northern Forest Res. Centre, Can. For. Serv., Forest Manage. Note 12. 4 p.

Alexander, M.E.; Lawson, B.D.; Stocks, B.J.; Van Wagner, C.E. 1984. User guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System, Interim Edition. Can. For. Serv. 76 p.

Beall, H.W. 1939. Tables for estimating the tracer index from early afternoon readings and table for diurnal hazard variation. Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Suppl. to Forest Fire Res. Note 5. 20 p.

Beall, H.W. 1947. Research in the measurement of forest fire danger. Paper presented to Fifth Brit. Empire For. Conf. Reprinted in 1967 as Inf. Rep. FF–X–8, Can. Dep. For. Rural Develop., Forest Fire Res. Inst. 9 p.

Beall, H.W. 1948. Forest fire danger tables (provisional), 2nd edition revised. Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Forest Fire Res. Note 12. 73 p.

Byram, G.M. 1959. Combustion of forest fuels. Chapter 3 *in* K.P. Davis, ed. Forest Fire: Control and Use. McGraw-Hill, New York.

Canadian Forestry Service. 1970. Canadian Forest Fire Weather Index. Can. Dep. Fish. Forest., Can. For. Serv. 25 p.

Canadian Forestry Service. 1972. Indice Forêt–Météo: méthode canadienne (provisoire). Serv. can. for., Inst. rech. feux forêt.

Canadian Forestry Service. 1976. Canadian Forest Fire Weather Index Tables. Environ. Can., Can. For. Serv. For. Tech. Rep. 13. 63 p.

Canadian Forestry Service. 1978. Canadian Forest Fire Weather Index Tables. Environ. Can., Can. For. Serv. For. Tech. Rep. 25. 40 p.

Canadian Forestry Service. 1984. Tables for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Environ. Can., Can. For. Serv. For. Tech. Rep. 25 (4th ed.) 48 p.

Engisch, R.L.; Walker, J.D. 1971. PDP–8L version of Simard's Fire Weather Index Program. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Intern. Rep. PS–23. 10 p.

Forestry Branch. 1957. Forest fire danger tables, 1956. Can. Dep. Northern Aff. Nat. Resources, For. Br. Issued separately for following regions: Newfoundland, New Brunswick, Ontario, Manitoba, Alberta East Slope. 14 p.

Forestry Branch. 1959. Forest fire danger tables. Can. Dep. Northern Aff. Nat. Resources, For. Br. Issued separately for Saskatchewan and Alberta. 14 p.

Harrington, J.B.; Flannigan, M.D.; Van Wagner, C.E. 1983. A study of the relations of components of the Fire Weather Index to monthly provincial area burned by wildfire in Canada 1953–80. Can. For. Serv., Petawawa Nat. For. Inst., Inf. Rep. PI–X–25. 65 p.

Kean, W.A. 1975. A PDP–8L program for calculating the Fire Weather Index. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Inf. Rep. PS–X–57. 12 p.

Kiil, A.D.; MacTavish, J.S. 1962. Forest fire danger tables: District of Mackenzie, Northwest Territories. Can. Dep. For., Forest Res. Br. 12 p.

Kiil, A.D.; Miyagawa, R.S.; Quintilio, D. 1977. Calibration and performance of the Canadian Fire Weather Index in Alberta. Can. For. Serv., Northern Forest Res. Centre. Inf. Rep. NOR–X—173. 45 p.

Kourtz, P.H. 1980. A calculator program for the Canadian Forest Fire Weather Index (magnetic card version). Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Nat. For. Inst., Inf. Rep. PI–X–3. 10 p.

Lawson, B.D. 1972. An interpretive guide to the Canadian Forest Fire Behavior System. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre, Inf. Rep. BCP–3–72. 17 p.

Lawson, B.D. 1977. Fire Weather Index: the basis for fire danger rating in British Columbia. Fisheries and Environ. Can., Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre, Inf. Rep. BC–P–17. 24 p.

MacTavish, J.S. 1965. Forest fire danger tables: British Columbia Coast. Can. Dep. For. Publication 1099. 20 p.

McArthur, A.G. 1967. Fire behavior in eucalypt forests. Australia Forest. Timber Bureau, Forest Res. Inst. Canberra. Leafl. 107. 36 p.

Muraro, S.J. 1968. A modular approach to a revised national fire danger rating system. *In* Contributions on the development of a national fire danger rating system. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre. Inf. Rep. BC–X–37. 9 p.

Muraro, S.J. 1971. A burning index for spruce-fir logging slash. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre. Suppl. BC–3 to Canadian Forest Fire Behavior System. 16 p.

Muraro, S.J.; Russell, R.N.; Lawson, B.D. 1969. Development of diurnal adjustments table for the Fine Fuel Moisture Code. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre. Inf. Rep. BC–X–35. 24 p.

Muraro, S.J.; Lawson, B.D. 1970. Prediction of duff moisture distribution for prescribed burning. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre. Inf. Rep. BC–X–46. 23 p.

Nelson, R.M. 1964. The National Fire Danger Rating System: Derivation of Spread Index for eastern and southern states. U.S. Forest Serv., Southeastern Forest Exp. Sta., Asheville, NC. Res. Pap. SE–13. 44 p.

Nikleva, S. 1975. Atmospheric Environment Service Fire Weather Program for British Columbia. Can. Dep. Environ., Atmos. Environ. Serv. (Pacific Region). 30 p.

Nikleva, S.; Parent, L.E. 1971. Calculation of fire danger indices by computer. Can. Dep. Environ., Atmos. Environ. Serv. Tech. Mem. TEC757. 7 p.

Paul, P.M. 1969. Field practices in forest fire danger rating. Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst. Inf. Rep. FF–X–20. 27 p.

Paul, P.M. 1970. Fire weather forecasting for the Maritime Provinces (1964–70). Can. For. Serv., Maritimes Forest Res. Centre. Inf. Rep. M–X–22. 79 p.

Paul, P.M.; MacTavish, J.S. 1965. Forest fire danger tables: British Columbia – Cariboo. Can. Dep. For. Publication 1101. 18 p.

Pouliot, L. 1974. Prévision de météorologie forestière au Québec. Environ. Can., Serv. can. for., Inst. rech. feux de forêt. Rapp. d'inf. FF–X–49. 33 p.

Quintilio, D. 1972. A burning index for lodgepole pine logging slash. Can. For. Serv., Northern Forest Res. Centre, Suppl. NFRC–1 to Canadian Forest Fire Behavior System.

Simard, A.J. 1970a. Reference manual and summary of test fire, fuel moisture, and weather observations made by forest fire researchers between 1931 and 1961. Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst. Inf. Rep. FF–X–25. 113 p.

Simard, A.J. 1970b. Computer program to calculate the Canadian Forest Fire Weather Index. Environ. Can., Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst., Internal Rep. FF–12. 18 p.

Simard, A.J. 1971. Calibration of surface wind speed observations in Canada. Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst., Inf. Rep. FF–X–30. 19 p.

Simard, A.J. 1973. Forest fire weather zones of Canada. Environ. Can., Can. For. Serv.

Simard, A.J.; Valenzuela, J. 1972. A climatological summary of the Canadian Forest Fire Weather Index. Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst. Inf. Rep. FF–X–34. 425 p.

Stocks, B.J. 1971. Fire severity index distribution in Ontario 1963 to 1968. Can. For. Serv., Great Lakes Forest Res. Centre. Inf. Rep. O–X–151. 18 p.

Stocks, B.J. 1972. A burning index for jack pine logging slash. Can. For. Serv., Great Lakes Forest Res. Centre. Suppl. ONT–1 to Canadian Forest Fire Behavior System.

Stocks, B.J. 1974. Wildfires and the Fire Weather Index System in Ontario. Environ. Can., Can. For. Serv., Great Lakes Forest Res. Centre. Inf. Rep. O–X–213. 17 p.

Turner, J.A. 1966. The stored moisture index: a guide to slash burning. Brit. Columbia Forest Serv., Protection Div. 7 p.

Turner, J.A. 1972. The Drought Code component of the Canadian Forest Fire Behavior System. Can. Dep. Environ., Can. For. Serv. Publication 1316.

Turner, J.A. 1973. A fire load index for British Columbia. Environ. Can., Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre. Inf. Rep. BC–X–80. 16 p.

Turner, J.A.; Lawson, B.D. 1978. Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System. Environ. Can., Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre. Inf. Rep. BC–X–177. 40 p.

U.S. Forest Service. 1958. Manual for forest fire control. U.S. Forest Serv., Northeastern Forest Fire Protection Comm., Chatham, N.Y.

U.S. Forest Service. 1966. Derivation of spread phase tables, National Fire Danger Rating System. U.S. Forest Serv., Div. Fire Control, Washington, DC. 54 p.

Van Wagner, C.E. 1970a. An index to estimate the current moisture content of the forest floor. Can. Dep. Fish. For., Can. For. Serv. Publication 1288. 23 p.

Van Wagner, C.E. 1970b. Conversion of Williams' severity rating for use with the Fire Weather Index. Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Inf. Rep. PS–X–21. 5 p.

Van Wagner, C.E. 1972a. Equilibrium moisture contents of some fine fuels in eastern Canada. Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta. Inf. Rep. PS-X-36. 11 p.

Van Wagner, C.E. 1972b. A diurnal table for the Fine Fuel Moisture Code. Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta. Inf. Rep. PS–X–38. 8 p.

Van Wagner, C.E. 1972c. Duff consumption in eastern pine stands. Can. J. Forest Res. 2(1): 34–39.

Van Wagner, C.E. 1974. Effect of duff weight on drying rate. Can. For. Serv. Bi-Mon. Res. Notes 30(2): 11–12.

Van Wagner, C.E. 1977. A method of computing fine fuel moisture content throughout the diurnal cycle. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Inf. Rep. PS–X–69. 15 p.

Van Wagner, C.E. 1979. A laboratory study of weather effects on the drying rate of jack pine litter. Can. J. Forest Res. 9(2): 267–275.

Van Wagner, C.E.; Pickett, T.L. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., For. Tech. Rep. 33. 18 p.

Williams, D.E. 1959. Fire season severity rating. Can. Dep. Northern Aff. Nat. Resources, Forest Res. Div. Tech. Note 73. 13 p.

Williams, D.E. 1964. Forest fire danger manual. Can. Dep. For. Publication 1027. 28 p.

Wright, J.G. 1933. Forest-fire hazard tables for mixed red and white pine forests. Can. Dep. Interior, For. Serv., Forest Fire Hazard Pap. 3. 20 p.

Wright, J.G. 1937. Preliminary improved fire hazard index tables for pine forests at Petawawa Forest Experiment Station. Can. Dep. Mines Resources, Dominion Forest Serv.

Wright, J.G.; Beall, H.W. 1938. Preliminary improved forest fire hazard tables for eastern Canada. Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Forest Fire Res. Note 5. 42 p.

APPENDIX I

SYMBOLS

SYMBOLS

All quantities used in the equations are represented in the following list by single letters, sometimes with subscript. The symbols are arranged in groups according to their place in the whole. All moisture contents are in percent of dry weight.

WEATHER

T – noon temperature, degrees C

H – noon relative humidity, percent

W – noon wind speed, km/h

r – rain in general

r_o – rainfall in open, measured at noon, mm

r_f – effective rainfall, FFMC

r_e – effective rainfall, DMC

r_d – effective rainfall, DC

r_w – total winter precipitation, DC

FINE FUEL MOISTURE CODE (FFMC)

m_o – fine fuel moisture content from previous day

$\triangle m$ – change in fine fuel moisture content due to rain

m – fine fuel moisture content after drying

E_d – fine fuel EMC for drying

E_w – fine fuel EMC for wetting

k_o – intermediate value of k

k – log drying or wetting rate, log m/day

k_d – log drying rate in particular

k_w – log wetting rate in particular

F_o – previous day's FFMC

F – present day's FFMC

DUFF MOISTURE CODE (DMC)

M_o – duff moisture content from previous day

M_r – duff moisture content after rain

M – duff moisture content after drying

K – log drying rate in DMC, log M/day

L_e – effective day length in DMC, hours

b – variable in DMC rain effect

P_o – previous day's DMC

P_r – DMC after rain

P – present day's DMC

DROUGHT CODE (DC)

Q – moisture equivalent of DC, units of 0.01 inch water

Q_o – moisture equivalent of previous day's DC

Q_r – moisture equivalent after rain

Q_f – final fall moisture equivalent

Q_s – starting spring moisture equivalent

V – potential evapotranspiration, units of 0.01 inch water per day

L_f – day length adjustment in DC

D_o – previous day's DC

D_r – DC after rain

D – present day's DC

INITIAL SPREAD INDEX (ISI)

f(W) – wind function

f(F) – fine fuel moisture function

R – present day's ISI

BUILDUP INDEX BUI

U – present day's BUI

FIRE WEATHER INDEX (FWI)

f(D) – duff moisture function

B – FWI (intermediate form)

S – present day's FWI

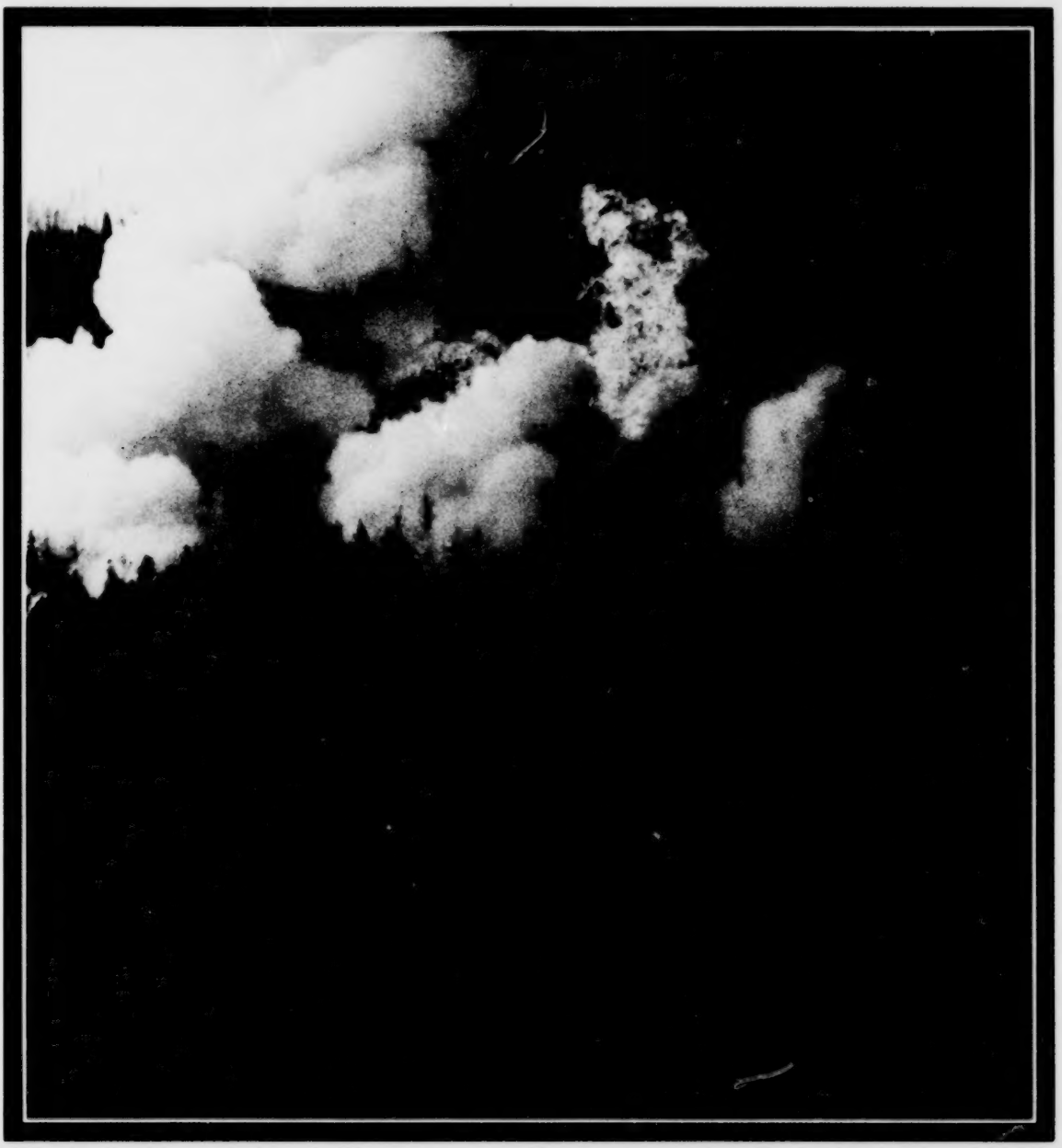
SEVERITY RATING

DSR – Daily Severity Rating

SSR – Seasonal Severity Rating

MCEDIF

Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo



Canada

Gouvernement du Canada
Service canadien des forêts

Government of Canada
Canadian Forestry Service

Service canadien des forêts
Gouvernement du Canada

Le Service canadien des forêts (SCF) réunit la majorité des spécialistes fédéraux en foresterie. Son objectif général est de promouvoir l'aménagement et l'utilisation judicieux des ressources forestières du Canada pour le plus grand bien économique, social et environnemental des Canadiens.

Voici les principales fonctions du SCF:

1. Coordonner les politiques fédérales afin de favoriser l'amélioration de la gestion des ressources et l'expansion de l'industrie forestière.

2. Fournir une orientation scientifique et technologique dans le domaine de la foresterie, par la recherche et le développement.

3. Fournir et analyser les statistiques et l'information nationales et internationales qui serviront à établir les politiques.

4. Mettre au point et homologuer des codes et des normes en matière de rendement des produits du bois.

5. Protéger les forêts canadiennes en luttant contre les ravageurs étrangers.

6. Parrainer l'utilisation éventuelle des ressources forestières pour la production d'énergie.

7. Adhérer aux objectifs environnementaux du gouvernement fédéral.

Divers organismes fédéraux participent aux programmes forestiers, et un comité de la stratégie forestière fédérale a été créé pour coordonner les activités fédérales en matière de foresterie. Le SCF a été désigné organisme directeur.

Le Service canadien des forêts comprend une administration centrale, six centres de foresterie et deux instituts nationaux. Les centres de foresterie doivent répondre aux impératifs régionaux et entretenir une liaison étroite avec les ministères provinciaux des Forêts. Ils participent également à des programmes nationaux dont ils assument fréquemment la direction. Les instituts nationaux sont les foyers des programmes d'envergure nationale.

Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo

C.E. Van Wagner

Institut forestier national de Petawawa
Chalk River (Ontario)

Abstract in English

Service canadien des forêts
Gouvernement du Canada
Rapport technique de foresterie 35F

Ottawa, 1987

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

Numéro de catalogue 64-35/1987F
ISBN 0-662-94113-6

D'autres exemplaires de cette publication peuvent être obtenus sans frais à l'adresse suivante:

Service canadien des forêts
Place Vincent-Massey, 3e étage
Ottawa (Ontario)
K1A 1G5

Une édition sur microfiche de cette publication peut être achetée à l'adresse suivante:

Micromedia Ltée
158, rue Pearl
Toronto (Ontario)
M5H 1L3

This publication is also available in English under the title *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System.*

Table des matières

	Page
Préface	vi
Résumé	vii
Abstract	viii
Introduction	1
Structure de base de la méthode de l'Indice Forêt-Météo	3
Indice du combustible léger	5
Historique	5
Échelle	5
Phase de dessèchement	6
Phase de pluie	9
Indice de l'humus	10
Historique	10
Échelle	10
Phase de pluie	11
Phase de dessèchement	11
Indice de sécheresse	12
Historique	12
Échelle	12
Phase de pluie	13
Phase de dessèchement	13
Accumulation hivernale	13
Échelle de la méthode de l'Indice Forêt-Météo	14
Indice de propagation initiale	17
Historique	17

Effet du vent 17
Effet de l'humidité du combustible léger 18
Équation 19
Indice du combustible disponible 20
Indice Forêt-Météo 21
Le facteur humidité de l'humus 21
Équation 23
Indice journalier de sévérité 23
Utilisation de la méthode de l'Indice Forêt-Météo 24
Calcul 24
Interprétation 24
Étalonnage 26
Classes de danger 27
Latitude 28
Conclusion 29
Ouvrages de référence 30
Annexe I. Symboles 33

Liste des figures

Page

Figure 1. Diagramme expliquant le fonctionnement de la méthode de l'Indice Forêt-Météo 4

Figure 2. Graphique des échelles de l'ICL en fonction de la teneur en eau du combustible léger 6

Figure 3. Variation de la vitesse de dessèchement logarithmique (k) en fonction de T, H et W dans l'ICL: a) k en fonction de T, pour H et W constants; b) k en fonction de H, pour T et W constants; c) k en fonction de W, pour T et H constants. Les valeurs maintenues constantes sont, pour T, 21,1 °C, pour H, 45 % et, pour W, 12 km/h 7

Figure 4. Isothermes de la teneur en eau à l'équilibre (E) en fonction de l'humidité relative (H) à 21,1 °C 8

Figure 5. Graphique de l'échelle des valeurs de l'IH en fonction de la teneur en eau de l'humus 10

Figure 6. Graphique de l'échelle des valeurs de l'IS en fonction de son humidité équivalente (Q) 12

Figure 7. Graphique de l'échelle I et de l'intensité de feux expérimentaux en fonction des valeurs de l'échelle D 14

Figure 8. Courbes des valeurs de quatre échelles de danger (I, B, S et D) en fonction des valeurs de l'échelle D, indiquant les deux points de base de l'échelle S 15

Figure 9. Effet de la vitesse du vent sur la vitesse relative de propagation dans l'IPI ainsi que les effets du vent indiqués par cinq sources. (La forme et la pente des courbes sont importantes, mais pas leur position relative.) 18

Figure 10. Effet de l'humidité du combustible léger (HCL) sur la vitesse relative de propagation dans l'IPI ainsi que les effets indiqués par trois sources. (La forme et la pente des courbes sont importantes, mais pas leur position relative.) 19

Figure 11. Effet de l'ICD sur l'intensité relative dans l'IFM, avec la nouvelle fonction pour les valeurs de l'ICD supérieures à 80 et la courbe reposant sur la théorie du transfert de la chaleur 22

Liste des tableaux

Page

1. Propriétés des trois indices d'humidité des combustibles 3

2. Coefficient pour la longueur du jour (L_e) dans l'indice de l'humidité de l'humus 11

3. Coefficient pour la longueur du jour (L_f) dans l'indice de sécheresse 13

Préface

L'Indice Forêt-Météo, utilisé depuis 1970, a demandé pour son élaboration originale quatre années d'efforts de la part de bon nombre de chercheurs du Service canadien des forêts. La partie principale du travail est l'œuvre de S.J. Muraro et J.A. Turner du Centre de recherche forestière du Pacifique (maintenant le Centre de foresterie du Pacifique), d'A.J. Simard de l'Institut de recherche sur les feux de forêt (qui a plus tard été rattaché à l'Institut forestier national de Petawawa) et de C.E. Van Wagner de la Forêt expérimentale de Petawawa (aujourd'hui l'Institut forestier national de Petawawa). D.E. Williams, alors directeur de l'Institut de recherche sur les feux de forêt, a été le coordonnateur du projet, lequel a donné lieu à une correspondance volumineuse et à plusieurs réunions générales. D'autres personnes ont également contribué de diverses façons à l'élaboration de l'indice et ont émis des commentaires et des conseils sur celui-ci: R.C. Henderson, B.D. Lawson et R.N. Russell du Centre de recherche forestière du Pacifique; A.D. Kiil, D. Quintilio et J.E. Grigel du Centre de recherche forestière du Nord (maintenant le Centre de foresterie du Nord); B.J. Stocks et J.D. Walker du Centre de recherche forestière des Grands Lacs (maintenant le Centre de foresterie des Grands Lacs); E.W. Howard et D.B. Bradshaw du Centre de recherche forestière de Terre-Neuve (maintenant le Centre de foresterie de Terre-Neuve); et D.G. Fraser, L.B. MacHattie, P.M. Paul, L. Pouliot et Gy. Péch de l'Institut de recherche sur les feux de forêt. Enfin, J.C. Macleod, coordonnateur du Programme de recherche sur les incendies de forêt, a exercé une influence et accordé un appui très utiles pendant toute la durée du projet.

Le Groupe de travail sur les dangers d'incendie du Service canadien des forêts a été chargé de voir au bon fonctionnement et au perfectionnement de l'Indice Forêt-Météo. Le groupe est actuellement composé de M.E. Alexander du Centre de foresterie du Nord, de B.D. Lawson du Centre de foresterie du Pacifique, de B.J. Stocks du Centre de foresterie des Grands Lacs et de C.E. Van Wagner de l'Institut forestier national de Petawawa.

La présente publication est la révision du rapport intitulé *Structure de l'indice canadien forêt-météo* (publication nº 1333), publié en 1974 par le Service canadien des forêts qui faisait alors partie du ministère de l'Environnement.

Résumé

L'Indice Forêt-Météo (IFM) est un indice des conditions météorologiques propices aux incendies de forêt. Il a été publié en 1970 après plusieurs années de travaux par des agents de recherche du Service canadien des forêts. Les meilleures caractéristiques de l'ancien indice de danger d'incendie ont été retenues dans le nouvel indice et un lien a été conservé entre l'ancien et le nouveau. L'IFM est fondé sur la teneur en humidité de trois classes de combustibles forestiers, plus l'effet du vent sur le comportement du feu. Il comprend six composantes: trois sous-indices primaires représentant l'humidité du combustible, deux sous-indices intermédiaires représentant le taux de propagation du feu et la consommation des combustibles, et un indice final représentant l'intensité de feu sous forme de rendement énergétique par unité de longueur. L'IFM se réfère fondamentalement à une forêt standard de pin, mais sert utilement comme indice général du danger d'incendie de forêt au Canada. C'est par des observations journalières des conditions météorologiques, à midi, qu'on le rédige: température, humidité relative, vitesse du vent et pluviosité (si elle existe). Ce document décrit le développement de l'IFM, les concepts qui ont présidé à sa préparation, et sa structure mathématique. De nouvelles versions de l'IFM ont été publiées en 1976 et 1984.

Abstract

The Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System was first issued in 1970 after several years' work by a number of fire researchers in the Canadian Forestry Service. The best features of the former fire danger index were incorporated in the FWI, and a link was preserved between old and new. The FWI is based on the moisture content of three classes of forest fuel plus the effect of wind on fire behavior. The system consists of six components: three primary subindexes representing fuel moisture, two intermediate subindexes representing rate of spread and fuel consumption, and a final index representing fire intensity as energy output rate per unit length of fire front. The FWI System refers primarily to a standard pine fuel type but is useful as a general measure of forest fire danger in Canada. Its components are determined every day from noon weather readings: temperature, relative humidity, wind speed, and rain (if any). The development of the Fire Weather Index, the concepts behind it, and its mathematical structure are described in this paper. Revised versions of the Fire Weather Index System were issued in 1976 and 1984.

Introduction

Aujourd'hui, tous les Canadiens en général reconnaissent l'importance de l'évaluation quotidienne du danger d'incendie de forêt. Les premières recherches dans ce domaine au Canada ont été effectuées par J.G. Wright en 1925. Pendant plusieurs décennies, lui, son collègue H.W. Beall et leurs successeurs ont mis au point quatre méthodes différentes pour la prévision du danger d'incendu, lesquelles se caractérisaient par une applicabilité de plus en plus grande à l'échelle du pays. Ceux que ces méthodes intéressent pourront consulter les références suivantes: Wright, 1933; Wright et Beall, 1938, ainsi que le supplément rédigé par Beall, 1939; Beall, 1948; et Forestry Branch, 1957. Pendant une dizaine d'années, à partir de 1957, on a publié, pour les diverses régions du Canada, des versions additionnelles de la quatrième méthode, chacune reposant sur des recherches effectuées sur le terrain et sur les types de combustibles importants localement (Forestry Branch, 1959; Kiil et MacTavish, 1962; Paul et MacTavish, 1965; et MacTavish, 1965).

Il nous faudrait beaucoup d'espace pour rendre compte de toutes les recherches sur l'évaluation des dangers d'incendie de forêt au Canada; d'ailleurs, ce n'est pas notre propos. Un très bon résumé des travaux des premières années est donné dans l'ouvrage de Beall (1947). Trois points méritent toutefois d'être soulignés. Premièrement, le perfectionnement des méthodes s'est fait comme une évolution, de sorte que certaines caractéristiques, quoique modifiées, ont été retenues d'une méthode à l'autre. Deuxièmement, il y a eu une tendance à la simplification tant dans les mesures requises des conditions météorologiques que dans la méthode de calcul, tendance qui a atteint son point culminant avec la quatrième méthode dans les années 50. Troisièmement, on a toujours procédé de la même façon, c'est-à-dire on s'est appuyé sur des expériences sur le terrain dont on a interprété les résultats au moyen d'équations mathématiques; la théorie physique a été d'une très grande utilité sur le plan qualitatif pour la conception des expériences, mais elle n'a pas été appliquée directement dans les analyses qui ont conduit aux résultats finals. À cause de cette façon de procéder, les données accumulées sur les conditions météorologiques, la teneur en eau des combustibles et l'évaluation des petits feux expérimentaux sont considérables; en outre, toutes ces données sont interreliées. C'est sur elles que reposent toutes les méthodes mentionnées précédemment.

Les moyens employés au début pour recueillir les données sur le terrain servant à l'évaluation du danger de feu ont été décrits par Paul (1969), et les méthodes employées pour les activités journalières, par Williams (1964). Toutes les données des recherches initiales qui étaient gardées dans les dossiers ont été cataloguées et organisées pour leur analyse sur ordinateur par Simard (1970a).

En 1969, la quatrième méthode, en neuf versions différentes, était utilisée presque partout au Canada. Ses principales caractéristiques étaient:

1. l'observation à midi des conditions météorologiques (pluie, humidité relative et vent, ainsi que la température dans plusieurs versions plus récentes);
2. des indices de danger d'incendie différents selon la saison;
3. l'évaluation quotidienne de la teneur en eau du combustible léger à partir de l'estimation du jour précédent;
4. la prise en considération des conditions météorologiques à long terme au moyen d'un indice de sécheresse donnant le nombre de jours depuis une précipitation d'environ 15 mm, jusqu'à concurrence de 25 jours;
5. l'évaluation du danger à partir des données sur l'humidité du combustible léger et la sécheresse (échelle allant de 0 à 16 et délimitant cinq classes de danger: nul, bas, modéré, élevé et extrême);
6. une correction pour l'effet du vent sur le comportement du feu, dans les dernières versions seulement;
7. des indices de danger complémentaires pour des types particuliers de combustibles, comme les combustibles qui sèchent rapidement, les rémanents, les graminées et le lichen des caribous (cladonie).

À la fin des années 60, les associations de protection contre les incendies de forêt étaient devenues plus technicisées et exprimaient des demandes sans cesse croissantes qui n'avaient pas été prévues lorsque la méthode alors employée pour l'évaluation du danger d'incendie avait été élaborée, vers le milieu des années 50. En réponse aux requêtes et aux commentaires formulés par un certain nombre d'associations provinciales, on a commencé à rechercher un nouvel indice. La structure de base de cet indice a été proposée par S.J. Muraro (1968), et, suivant une suggestion de J.C. Macleod, on lui a donné le nom de *Canadian Forest Fire Weather Index*, devenu en français «Indice Forêt-Météo». Ce nouvel indice n'exigeait pas d'observations météorologiques supplémentaires, mais la tendance à la simplification était inversée jusqu'à un certain point. On s'est efforcé tout au long du projet de se servir autant que possible des travaux effectués antérieurement en retenant et perfectionnant les meilleurs éléments de la méthode antérieure et en ajoutant de nouvelles composantes lorsque c'était nécessaire. La version originale de l'Indice Forêt-Météo et de ses composantes a été publiée en 1970 (Canadian Forestry Service, 1970). La version française a été publiée en 1972 (Service canadien des forêts, 1972). De nouvelles éditions des tables servant au calcul de l'indice ont été publiées en 1976, 1978 et 1984 (Service canadien des forêts, 1976, 1978 et 1984) afin d'apporter certaines modifications d'ordre mathématique et d'effectuer la conversion des unités impériales aux unités métriques. La continuité de base a été maintenue; la méthode de l'Indice Forêt-Météo conserve un lien étroit avec les méthodes précédentes et représente un pas de plus dans la voie prise par J.G. Wright lorsque celui-ci a lancé les recherches sur les incendies de forêt au Canada, en 1925.

Structure de base de la méthode de l'Indice Forêt-Météo

La méthode de l'Indice Forêt-Météo (IFM) comporte six indices normalisés. Les trois premiers indiquent les variations journalières de la teneur en eau de trois types de combustibles forestiers ayant différentes vitesses de dessèchement. Les trois autres se rapportent au comportement du feu et sont représentatifs de la vitesse de propagation, de la quantité de combustibles brûlés de même que de l'intensité du feu. La méthode repose uniquement sur la détermination quotidienne, à midi (heure normale locale), des conditions météorologiques: température, humidité relative, vitesse du vent et pluie durant les 24 dernières heures (s'il y en a eu). Le mois doit également être précisé. La méthode consiste essentiellement à résoudre une série d'équations (Van Wagner et Pickett, 1985) qui peuvent être calculées rapidement par ordinateur; elle contraste en cela avec les méthodes précédentes qui utilisaient une série de courbes qui étaient converties directement sous forme de tables. L'Indice Forêt-Météo peut également être calculé à l'aide de la série publiée de neuf tables établies à partir de ces équations (Service canadien des forêts, 1984).

À remarquer que, même si l'IFM est calculé à partir des mesures des conditions météorologiques à midi, il est en réalité représentatif des conditions du milieu de l'après-midi quand le danger d'incendie est au maximum, moment généralement établi à 16 h. En effet, au cours des premiers travaux, des corrélations ont été établies entre les variables pour les conditions météorologiques à midi et les données sur la teneur en eau du combustible léger et les feux expérimentaux, données qui ont été obtenues plus tard dans l'après-midi. À cet égard, la méthode de l'IFM est semblable à toutes les autres méthodes utilisées au Canada depuis 1938.

Pour chacun des trois types de combustibles pris en considération, on a créé un indice comprenant deux phases, une phase pour le mouillage par la pluie et une autre pour le dessèchement. Ces sous-index, appelés «indices du combustible», permettent de rendre compte de l'augmentation de la teneur en eau après une pluie et de sa diminution sous l'effet du dessèchement journalier. Afin d'obtenir le meilleur effet psychologique, on a établi ces indices de telle sorte que leur valeur numérique croît lorsque la teneur en eau décroît. Les trois indices de la teneur en eau des combustibles sont:

1. *L'indice du combustible léger (ICL)*, qui représente la teneur en eau d'une couche de litière et d'autres combustibles légers séchés pesant environ 0,25 kg (masse anhydre) par mètre carré;
2. *L'indice de l'humus (IH)*, qui représente la teneur en eau d'une couche de matières organiques en décomposition et peu compactes pesant environ 5 kg (masse anhydre) par mètre carré;
3. *L'indice de sécheresse (IS)*, qui est représentatif d'une couche profonde de matières organiques compactes pesant peut-être 25 kg (masse anhydre) par mètre carré.

Ces définitions fournissent des éclaircissements utiles, mais pour la comparaison des indices, il vaut mieux parler en termes de capacité de rétention d'eau et de vitesse de dessèchement. On considère que chaque combustible sèche de façon exponentielle et que sa vitesse de dessèchement à un moment donné est proportionnelle à sa teneur en eau libre. Un indice approprié de la vitesse de dessèchement est donc fourni par le laps de temps nécessaire pour réduire d'une quantité $1 - 1/e$ (d'environ 2/3) la quantité d'eau libre dépassant la teneur à l'équilibre ou par la pente de la courbe exponentielle de la teneur en eau libre en fonction du temps, pente appelée ici «vitesse de dessèchement logarithmique». Le tableau 1 fait voir pour chacun des indices d'humidité ce laps de temps, exprimé en nombre de jours normaux (température de 21,1 °C [70 °F] et humidité relative de 45 % à midi en juillet), ainsi que sa capacité de rétention d'eau, ses caractéristiques et les paramètres météorologiques à mesurer chaque jour pour son calcul.

Les deux indices d'humidité qui changent lentement, l'IH et l'IS, répondent aux changements de la longueur des jours au cours de la saison. En effet, la quantité d'eau perdue chaque jour par les combustibles à dessèchement lent dépend autant de la durée du jour que des conditions atmosphériques à midi. Par contre, l'ICL, qui représente la teneur en eau des combustibles à dessèchement rapide au milieu de l'après-midi, dépend moins de la longueur du jour.

Tableau 1. Propriétés des trois indices d'humidité des combustibles

Indice	Laps de temps considéré (jours)	Capacité de rétention d'eau (mm)	Paramètres requis[a]	Profondeur théorique du combustible (cm)	Quantité théorique du combustible (kg/m^2)
ICL	2/3	0,6	T, H, W, r	1,2	0,25
IH	12	15	T, H, r, mo	7	5
IS	52	100	T, r, mo	18	25

[a]T – température, H – humidité; W – vent, r – pluie, mo – mois.

En combinant deux à deux les trois indices d'humidité et le vent, on obtient deux indices intermédiaires qui, combinés, donnent l'indice final, l'IFM (figure 1). Ces trois derniers indices sont:
L'indice de propagation initiale (IPI), qui résulte de la combinaison du vent et de l'ICL et qui représente uniquement la vitesse de propagation sans tenir compte de l'effet des quantités variables de combustibles;
L'indice du combustible disponible (ICD), qui résulte de la combinaison de l'IH et de l'IS et qui représente la quantité totale de matières forestières disponibles au feu en progression;
L'Indice Forêt-Météo (IFM), qui résulte de la combinaison de l'IPI et de l'ICD et qui représente l'intensité du feu en progression d'après la quantité d'énergie produite par unité de longueur du front.

Le calcul des différents indices se fait à l'aide de fonctions mathématiques qui sont décrites plus loin; de plus, chaque indice a une échelle de valeurs qui lui est propre. La fonction rendant compte du vent dans l'IPI est une exponentielle simple qui double la valeur de l'IFM pour chaque augmentation de 19 km/h de la vitesse du vent. Les fonctions qui s'appliquent à l'indice du combustible léger et à l'indice de l'humus sont semblables à celles de la méthode précédente. Pour tenir compte de l'effet du dessèchement à long terme, on a donné à l'IS un poids faible mais variable qui apporte une correction à l'IH.

Le type de combustible dit «standard» est une forêt de pin généralisée se rapprochant le plus de la forêt de pin gris et de pin tordu qu'on trouve en une bande presque continue d'un bout à l'autre du Canada. Ce type correspond aux données de terrain sur lesquelles repose l'IFM. En fait, pour l'élaboration de l'IFM, on a également utilisé des peuplements de pin blanc et de pin rouge ainsi que des plantations de pin rouge pour obtenir les données sur la teneur en eau des combustibles et le comportement des feux. Il a cependant été décidé très tôt que le but principal du projet était la création d'un nouvel indice de danger de feu basé uniquement sur les conditions météorologiques, qui permettrait d'obtenir des résultats uniformes partout au Canada. La question de savoir comment le comportement du feu varie en fonction du type de combustible est apparue comme étant un problème distinct qui devait être abordé d'une autre façon.

Dans les parties suivantes, nous décrirons de façon détaillée chacun des indices. Nous traiterons également de l'interprétation et de l'efficacité de l'IFM ainsi que de son utilisation et de son perfectionnement futurs. Les méthodes et les raisonnements ayant servi à l'élaboration de l'IFM sont présentés de façon détaillée lorsque cela est nécessaire pour élucider diverses décisions. Les équations sont insérées dans les descriptions. La signification des abréviations et des symboles est donnée au fur et à mesure de leur apparition dans le texte; de plus, une liste de tous les symboles est présentée à l'annexe I. Les abréviations «ln» et «log» sont utilisées pour désigner respectivement les logarithmes népériens, de base *e*, et les logarithmes décimaux, de base 10.

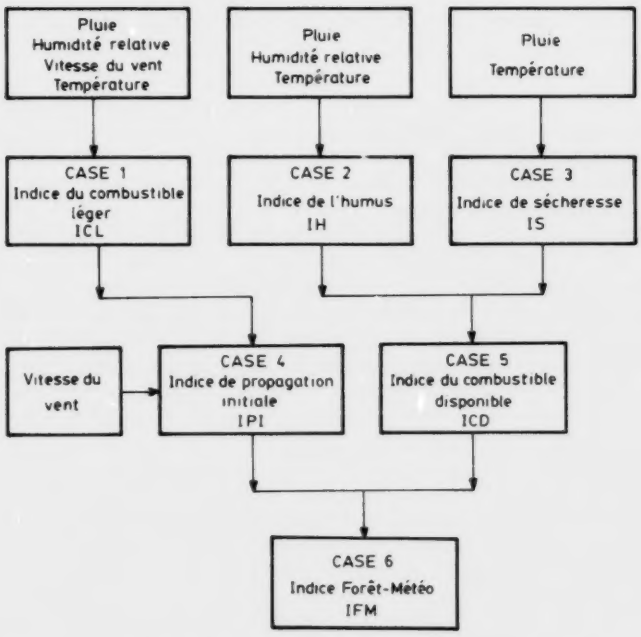


Figure 1. Diagramme expliquant le fonctionnement de la méthode de l'Indice Forêt-Météo.

Indice du combustible léger

Historique

On considère le «Tracer Index» comme l'ancêtre de l'indice du combustible léger (ICL); cet indice, qui s'applique à la litière, constituait à origine la principale composante d'une méthode d'évaluation du danger d'incendie pour les forêts de l'Est (Wright, 1937). Il a été élaboré à partir des données sur la teneur en eau des combustibles et les conditions météorologiques correspondantes qui ont été obtenues dans des peuplements de pin à Petawawa. Pour ce, on a mis en corrélation les teneurs en eau de chaque jour avec les conditions météorologiques correspondantes et la teneur en eau du jour précédent. Le combustible représenté par cet indice était une couche d'aiguilles de pin ou toute autre litière de surface faisant probablement environ 0,25 kg par mètre carré. Ce type de combustible peut être dit à dessèchement relativement rapide, mais l'importance donnée à la valeur de la veille fait que le dessèchement ne peut être instantané. Au cours des années qui ont suivi, divers chercheurs travaillant dans le domaine ont constaté que le Tracer Index rendait bien compte des teneurs en eau des litières dans beaucoup de régions du Canada; c'est ce qui explique que nous le retrouvons dans toutes les tables de danger d'incendie publiées depuis par l'organisme fédéral de recherche forestière. La version particulière de l'indice choisie pour l'élaboration de l'ICL se trouve dans les tables d'évaluation du danger d'incendie forestier publiées par Beall en 1948. Cependant, pour répondre aux besoins spéciaux de la nouvelle méthode, des modifications ont été apportées, après analyse, à l'indice original.

La description qui suit de l'indice du combustible léger est assez complète étant donné qu'il n'existe aucune autre référence importante sur le sujet.

Échelle

Le Tracer Index original avait simplement pour formule 150 moins la teneur en eau. Sa plus haute valeur était de 144, et sa plus basse, de 40; l'échelle avait donc 104 points. Comme on voulait pour la nouvelle méthode (version tabulaire) un indice binaire ayant une valeur maximale de 99, donc une échelle ayant cinq points de moins, la valeur minimale de la teneur en eau (m) a été fixée à 2 %, de sorte que l'équation pour l'échelle de l'ICL était:

$$F = 101 - m \qquad (1)$$

où F représentait l'ICL. Cette échelle a été utilisée dans les trois premières éditions de la méthode de l'IFM, mais elle a été modifiée dans la version de 1984 pour deux raisons:

1) la teneur réelle en eau de la litière de pin peut atteindre jusqu'à environ 150 %;
2) on souhaitait une échelle réaliste de la teneur en eau pour assurer la compatibilité future de l'ICL face aux progrès à venir dans la prévision de l'humidité du combustible léger.

Une nouvelle échelle, appelée «échelle FF», a donc été élaborée suivant deux équations:

$$F = 59{,}5\,(250-m)/(147{,}2 + m) \qquad (2a)$$
$$m = 147{,}2\,(101-F)/(59{,}5 + F) \qquad (2b)$$

Cette échelle (figure 2) assure une conversion réaliste des valeurs de l'indice aux valeurs correspondantes de la teneur en eau; elle permet que les opérations internes relatives à l'ICL se fassent à partir des valeurs de la teneur en eau; et elle reste comparable à l'échelle traditionnelle. De plus, la valeur minimale artificielle de 2 % pour la teneur en eau n'est plus nécessaire pour les calculs. La longueur potentielle de l'échelle est maintenant de 101 points.

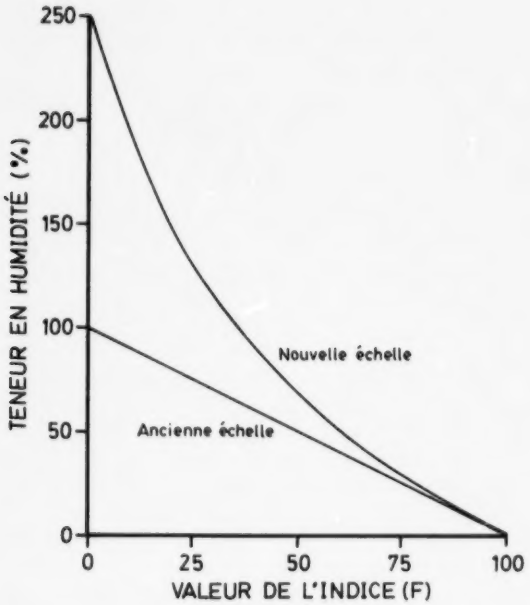


Figure 2. Graphique des échelles de l'ICL en fonction de la teneur en eau du combustible léger.

Phase de dessèchement

Pour l'analyse du Tracer Index, on a, dans un premier temps, cherché des périodes de dessèchement se caractérisant par des valeurs constantes pour la température (T), l'humidité relative (H) et le vent (W) et, pour chacune, en partant du point de saturation, on a déterminé dans les tables du Tracer Index les valeurs journalières jusqu'à ce qu'il n'y ait plus aucun changement. On a ensuite soustrait la teneur en eau à l'équilibre (E) ainsi déterminée pour chaque période de dessèchement des teneurs en eau de chaque jour (m) et on a reporté sur des graphiques les teneurs en eau libre, exprimées en log (m-E), en fonction du temps en jours. On a ainsi obtenu, pour chacune des huit classes d'humidité, six courbes semi-logarithmiques correspondant à différentes vitesses du vent, toutes pour la classe originale de température de 60 à 80 °F (15,6 à 26,7 °C). Le point central de la classe de température, 70 °F (21,1 °C), a été désigné comme température normale pour toute l'analyse.

On a alors constaté que ces courbes semi-logarithmiques étaient, dans l'ensemble, assez droites pour qu'on puisse supposer un dessèchement exponentiel. Autrement dit, quelle que soit la teneur en eau, le changement journalier pouvait être représenté par la pente de la courbe semi-logarithmique du dessèchement; cette pente est appelée «vitesse de dessèchement logarithmique» (k), exprimée en teneur en eau logarithmique par jour.

Dans une deuxième étape, on a calculé les valeurs de k pour les 48 courbes semi-logarithmiques et on les a reportées sur un graphique en fonction de la vitesse du vent (W), compte tenu des classes d'humidité (H), ce qui a permis d'arriver, après harmonisation, à l'équation suivante:

$$k = a + bW^{0,5} \qquad (3)$$

où a et b sont des variables dépendant de H et sont prévues égales à 0 lorsque H = 100. L'équation complète est la suivante:

$$k_o = 0,424[1 - (H/100)^{1,7}] + 0,0694W^{0,5}\,[1 - (H/100)^{8}] \qquad (4)$$

où k_o est employé pour indiquer qu'il s'agit de la vitesse de dessèchement logarithmique à la température normale (21,1 °C). Nous pouvons voir à la figure 3 la variation de k_o en fonction de H et de W. Que W soit à la racine carrée dans l'équation traduit l'effet proportionnellement plus élevé du vent sur la vitesse de dessèchement lorsque la vitesse du vent est plus faible, effet qui a été constaté dans le Tracer Index ainsi que dans les données théoriques et expérimentales de Van Wagner (1979).

En troisième lieu, on a examiné le processus de mouillage sous une forte humidité. En partant du degré de sécheresse maximale, on a obtenu 24 courbes semi-logarithmiques des augmentations quotidiennes, comme pour le dessèchement. La variation observée de la pente était très faible, autour d'une valeur moyenne de k de 0,3. Cette valeur constante a été utilisée dans les trois premières éditions des tables de l'IFM (Service canadien des forêts, 1972, 1976 et 1978). Toutefois, comme les lois de la physique veulent que la vitesse de mouillage atmosphérique soit fonction de la température et de l'humidité relative, ce qui est corroboré par des données obtenues tant au laboratoire que sur le terrain, dans la dernière version des tables (Service canadien des forêts, 1984), on a tenu compte de la variation de la vitesse de mouillage en reformulant les équations pour la vitesse de dessèchement avec 100 – H au lieu de H, comme suit:

$$k_o = 0{,}424 \left[1 - \left(\frac{100-H}{100} \right)^{1,7} \right] + 0{,}0694 W^{0,5} \left[1 - \left(\frac{100-H}{100} \right)^{8} \right] \quad (5)$$

où k_o représente, dans ce cas, la vitesse de mouillage logarithmique à la température normale (21,1 °C).

Quatrièmement, l'effet de la température sur les vitesses de dessèchement et de mouillage a été déterminé à partir d'expériences en laboratoire. Dans le Tracer Index, l'effet de la température avait été jugé trop faible, une augmentation de 20 °F (11,1 °C) n'entraînant qu'une augmentation de 15 % de la vitesse de dessèchement, alors que des tests effectués en laboratoire avec des aiguilles de pin indiquaient une augmentation de 50 %. La fonction établie pour rendre compte de l'effet de la température est la suivante:

$$k = k_o \times 0{,}581 e^{0{,}0365T} \quad (6)$$

où T est la température en degrés Celsius, et k, soit la vitesse de dessèchement logarithmique (k_d), soit la vitesse de mouillage logarithmique (k_w), exprimées en teneur en eau logarithmique par jour. On peut voir dans le rapport de Van Wagner (1979) sur ces tests en laboratoire que l'effet de la température est rectilinéaire sur un graphique de log k en fonction de l'inverse de la température absolue. La relation décrite par l'équation 6 ci-dessus et représentée à la figure 3 est essentiellement équivalente.

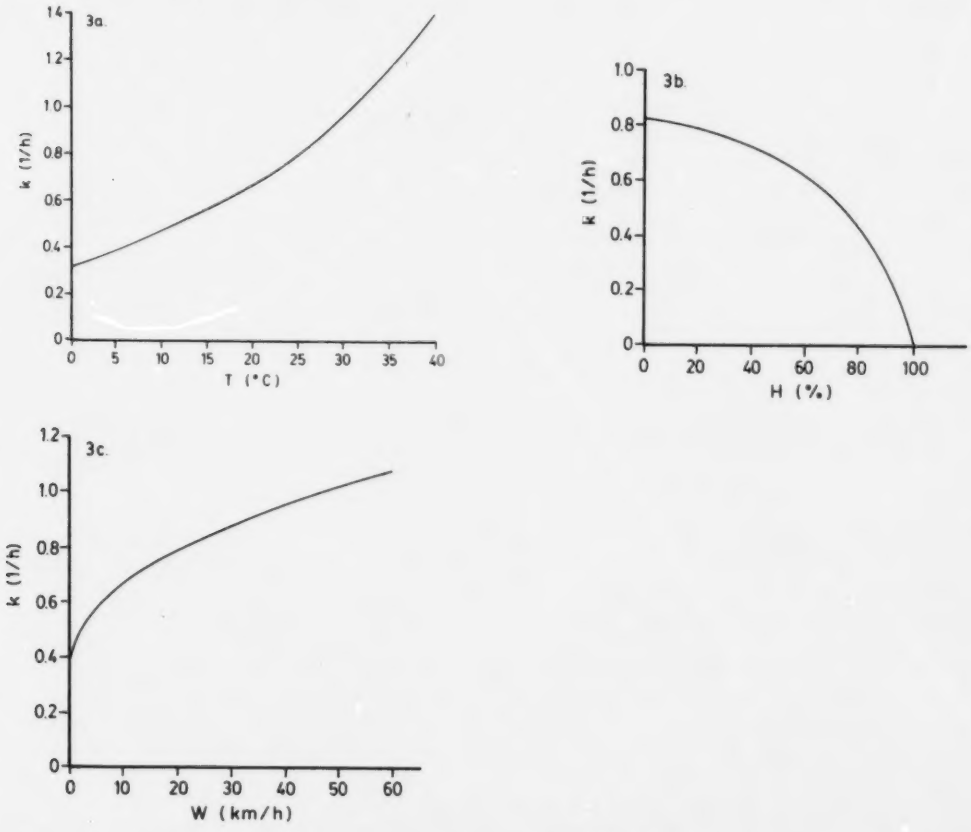


Figure 3. Variation de la vitesse de dessèchement logarithmique (k) en fonction de T, H et W dans l'ICL: a) k en fonction de T, pour H et W constants; b) k en fonction de H, pour T et W constants; c) k en fonction de W, pour T et H constants. Les valeurs maintenues constantes sont, pour T, 21,1 °C, pour H, 45 % et, pour W, 12 km/h.

Dans la première édition des tables de l'IFM (Service canadien des forêts, 1972), l'ICL était présenté dans une table principale en fonction de H et de W, une table complémentaire étant fournie pour la correction pour la température. Ces tables étaient pratiques, mais les résultats n'étaient pas tout à fait exacts mathématiquement. Les éditions suivantes renfermaient des tables différentes de l'ICL en fonction de H et de W pour chaque intervalle de T de façon à assurer une plus grande exactitude.

Cinquièmement, les valeurs pour la teneur en eau à l'équilibre (E) obtenues lors de la première étape ont été reportées sur des graphiques, et les courbes ont été adoucies et modifiées en partie suivant les résultats obtenus en laboratoire pour plusieurs types de litières forestières (Van Wagner, 1972a). Dans le Tracer Index original, les valeurs de E obtenues par mouillage étaient de 1 à 2 % plus basses que celles obtenues par dessèchement. Cette hystérésis, également observée au laboratoire,a été retenue dans la méthode actuelle.On a toutefois rendu les nouvelles courbes de E indépendantes de la vitesse du vent, en partie pour simplifier et en partie parce que, en théorie, E ne devrait dépendre que de H et de T.

Cette analyse de la teneur en eau à l'équilibre (E), effectuée pour la classe originale de température (60-80 °F), a été jugée valide pour la température normale de 70 °F (21,1 °C). Comme le Tracer Index ne présentait aucune variation de E en fonction de la température (T), l'effet de la température sur E a été déterminé à partir de tests en laboratoire (Van Wagner,1972a).Ces tests ont indiqué une différence d'environ 1 % de la valeur de E pour chaque différence de la température de 10 °F (5,6 °C), en sens contraire.

Les deux courbes de E en fonction de H à la température normale (appelées «isothermes»), l'une pour le mouillage et l'autre pour le dessèchement, ont été exprimées sous forme d'une équation par J.A. Turner (Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique):

$$E = a\,H^{b} + c\,e^{(H-100)/d} \qquad (7)$$

où a, b, c et d sont des constantes. Cette équation de base a été modifiée pour tenir compte de l'écart de la température par rapport à 21,1 °C. De plus, pour assurer la convergence des deux équations à 0 lorsque H = 0, un terme additionnel de correction jouant lorsque H est près de 0 a été introduit. Les équations complètes pour E en fonction de H et de T sont:

$$E_d = 0{,}942H^{0{,}679} + 11e^{(H-100)/10} + 0{,}18(21{,}1-T)(1-e^{-0{,}115H}) \qquad (8a)$$

$$E_w = 0{,}618H^{0{,}753} + 10e^{(H-100)/10} + 0{,}18(21{,}1-T)(1-e^{-0{,}115H}) \qquad (8b)$$

où E_d est la teneur en eau à l'équilibre obtenue par dessèchement par en dessus, et E_w, la teneur en eau à l'équilibre obtenue par mouillage par en dessous, en pourcentage par rapport à la masse anhydre. Ces équations sont représentées à la figure 4.

La teneur en eau pour l'ICL pour la phase de dessèchement se calcule maintenant comme suit: si la teneur en eau de la veille (m_o) est plus élevée que E_d, un régime de dessèchement prévaut, et la teneur en eau du jour (m) est déterminée à l'aide de l'équation suivante:

$$m = E_d + (m_o - E_d) \times 10^{-k_d} \qquad (9)$$

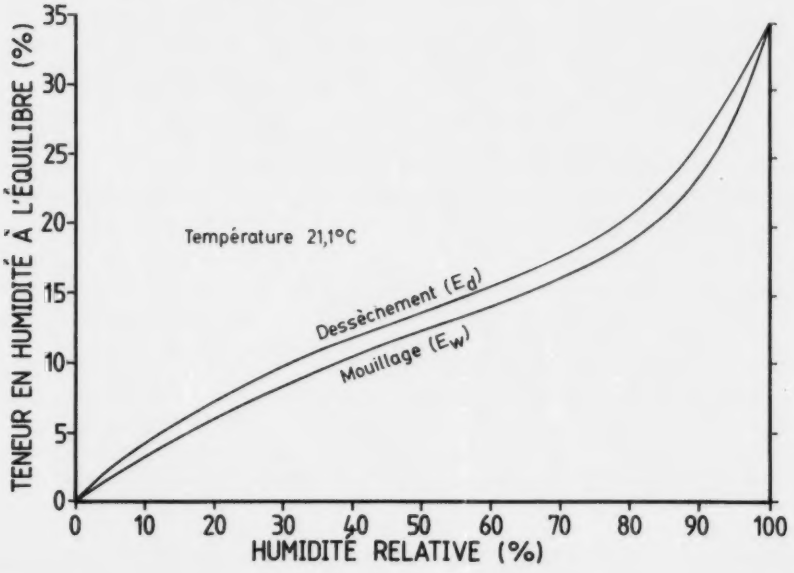


Figure 4. Isothermes de la teneur en eau à l'équilibre (E) en fonction de l'humidité relative (H) à 21,1 °C.

Par contre, si m_o est inférieur à E_w, m est déterminé à l'aide de l'équation:

$$m = E_w - (E_w - m_o) \times 10^{-k_w} \quad (10)$$

où k_d et k_w sont, selon le cas, la vitesse de dessèchement logarithmique et la vitesse de mouillage logarithmique, déterminées au moyen de l'équation (5). Si m_o se situe entre E_d et E_w, on suppose qu'il n'y a aucun changement, et $m = m_o$.

Phase de pluie

On a ensuite étudié l'effet de la pluie sur les valeurs du Tracer Index. On a analysé dans la table originale pour la pluie l'augmentation de la teneur en eau en fonction de la quantité de pluie. On a ainsi constaté que plus la quantité de pluie et plus la teneur initiale en eau (m_o) étaient élevées, plus l'augmentation était faible. Autrement dit, plus la quantité de pluie est élevée, plus la proportion qui est retenue par la litière est faible; et plus la teneur initiale en eau de la litière est élevée, moins grande est la quantité de pluie que la litière peut absorber. J.A. Turner avait fourni, pour les versions antérieures de la méthode, une série de trois équations, s'appliquant selon la quantité de pluie, qui s'accordaient bien avec la table originale. Ces équations étaient formulées avec l'indice. Pour la nouvelle version, un sous-programme pour la pluie employant les valeurs de la teneur en eau plutôt que les valeurs de l'indice a été nécessaire. Une nouvelle équation a donc été élaborée, celle-ci se présentant comme suit:

$$\triangle m/r = c\, e^{-b/(250-m_o)} (1-e^{-a/r}) \quad (11)$$

où $\triangle$ m est l'augmentation de m due à la pluie (r), et a, b et c sont des constantes. Le chiffre 250 correspond à la valeur maximale de la teneur en eau dans l'échelle FF décrite précédemment. L'efficacité de la pluie ($\triangle m/r$) diminue plus m_o est élevé, sous l'effet du premier terme entre parenthèses, et plus r est élevé, sous l'effet du deuxième terme entre parenthèses.

La constante c a d'abord été établie comme étant la limite de $\triangle m/r$ quand m_o et r tendent vers zéro. Pour la quantité standard de combustible, 0,25 kg/m^2, le premier millimètre de pluie devrait donc entraîner une augmentation de m de 400 %. Cette valeur a été réduite à 42,5 pour s'accorder avec les données de la table pour la pluie du Tracer Index original et les équations de Turner, ce qui signifierait que l'efficacité maximale de la pluie en ce qui concerne le mouillage de la litière serait seulement de 10 % environ.

Les essais avec les autres coefficients ont permis d'établir l'équation suivante:

$$\triangle m/r_f = 42{,}5\, e^{-100/(251-m_o)} (1-e^{-6{,}93/r_f}) \quad (12)$$

On a remplacé 250 par 251 afin d'empêcher la division par zéro si m_o était égal à 250; r_f est la quantité nette de pluie suivant la définition donnée plus loin à l'équation 14. Lorsque les résultats sont convertis en valeurs de l'indice, ils correspondent avec ceux obtenus au moyen des équations précédentes, à un ou deux points près, pour de grands intervalles des quantités de pluie et des teneurs en eau initiales, avec une petite exception comme nous l'expliquerons ci-après.

Comme la performance de l'équation 12 est légèrement anormale quand, à la fois, la quantité de pluie et la teneur initiale en eau sont élevées, un terme de correction est prévu; il s'applique lorsque la teneur initiale en eau est élevée. Ce terme est le suivant:

$$0{,}0015\,(m_o-150)^2 r_f^{0,5} \quad (13)$$

Il est ajouté à l'équation 12 seulement lorsque m_o dépasse 150 et entre en jeu lorsque la valeur résultante pour l'ICL est de 5 environ ou moins.

Enfin, la quantité de pluie à utiliser dans les équations 12 et 13 a été réduite de manière à tenir compte de la diminution due au couvert. On a donc:

$$r_f = r_o - 0{,}5 \quad (14)$$

où r_f est la quantité nette de pluie, et r_o, la quantité observée à découvert, en millimètres. En d'autres mots, on ne tient pas compte des pluies de 0,5 mm ou moins dans le calcul de l'ICL. Par temps sec, les équations pour la pluie ne sont pas utilisées. Il est supposé que l'augmentation de la teneur en eau attribuable à la pluie se produit toujours avant que ne commence le dessèchement de la journée.

Ainsi se termine la description de l'indice du combustible léger dans sa nouvelle version. Ajoutons qu'il est bien connu que la teneur en eau du combustible léger varie fortement, de manière ondulatoire, au cours d'une journée. Quand le combustible est mouillé par la pluie, cette onde journalière se superpose à la variation journalière générale de la teneur en eau jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. L'ICL n'est indicatif que des conditions dans l'après-midi (prévisions faites à partir des observations à midi), et d'autres méthodes sont nécessaires pour évaluer la teneur en eau du combustible léger à d'autres moments de la journée. Muraro et coll. (1969) ont élaboré une telle méthode que Van Wagner (1972b) a utilisée pour construire une table des variations de l'ICL au cours de la journée. Plus récemment, une méthode informatisée reposant sur des observations horaires (ou du moins fréquentes) des conditions météorologiques au cours de la journée a été mise au point (Van Wagner, 1977).

Indice de l'humus

Historique

Dans le supplément de Beall (1939) à la deuxième génération d'indices de danger d'incendie de forêt, un indice secondaire, appelé «indice de sécheresse» a été introduit. Alors que le Tracer Index n'était ordinairement représentatif que des conditions météorologiques des quelques derniers jours et de leur effet sur la teneur en eau du combustible léger, l'indice de sécheresse pouvait tenir compte des conditions météorologiques enregistrées jusqu'à 25 jours auparavant. Sa fonction était de catégoriser le danger d'incendie quotidien suivant le nombre de jours depuis la dernière pluie appréciable. Du point de vue physique, une comparaison pourrait être faite avec un réservoir où la pluie s'accumule et qui perd une quantité constante d'eau chaque jour où il ne pleut pas. Même si l'indice de sécheresse, contrairement à un vrai combustible, variait de façon linéaire au cours des phases de dessèchement et de mouillage, il a joué un rôle utile dans les deux méthodes d'évaluation du danger d'incendie établies par la suite.

Vers 1970, lorsqu'on a commencé à travailler sur la première version de la méthode de l'Indice Forêt-Météo, il était généralement reconnu qu'un indice auxiliaire représentant la teneur en eau d'un véritable combustible forestier à dessèchement lent était nécessaire. Le combustible choisi a été, en raison de sa présence dans toutes les forêts canadiennes, la couche d'humus brut, qui est à peu près l'équivalent de l'horizon F en pédologie. C'est ainsi qu'est apparu dans la nouvelle méthode l'indice de l'humus (IH). Son élaboration a demandé quatre années de travail sur le terrain, surtout dans des peuplements de pin rouge et de pin gris. Ce travail a consisté essentiellement à peser chaque jour des échantillons rectangulaires de matières organiques placés sur des plateaux rectangulaires (60 × 40 cm), lesquels avaient été déposés au sein de la couverture morte. L'IH est représentatif des couches d'humus brut à environ 7 cm de profondeur et pesant environ 5 kg (masse anhydre) par mètre carré. Comme une description de cet indice a déjà été publiée (Van Wagner, 1970a), nous ne donnerons ici qu'un aperçu de sa structure.

Échelle

L'échelle de l'IH a été conçue suivant le modèle du *Buildup Index* employé aux États-Unis (U.S. Forest Service, 1966). Elle a la forme d'une fonction logarithmique qui dépend de la teneur réelle en eau, la valeur de l'indice augmentant avec le déssèchement. Son équation type est la suivante:

$$P = c\,[\log (M_{max}-E) - \log (M - E)] \qquad (15)$$

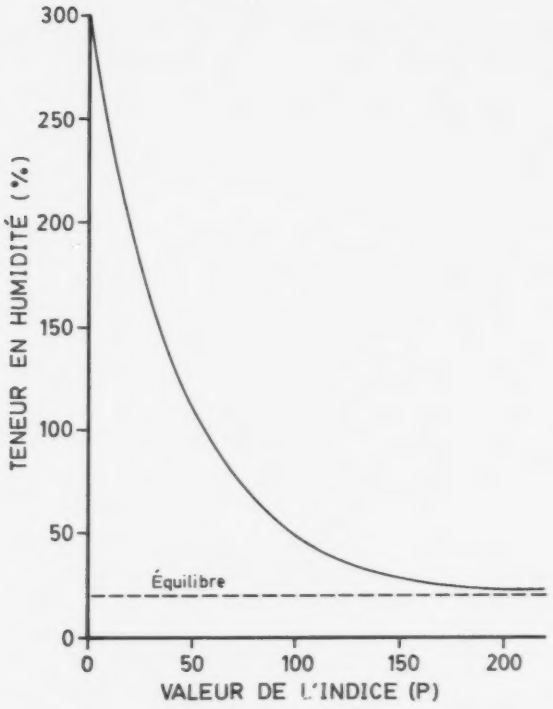


Figure 5. Graphique de l'échelle des valeurs de l'IH en fonction de la teneur en eau de l'humus.

où c est une constante de l'échelle, P, la valeur de l'indice, M, la teneur en eau, et E, la teneur en eau à l'équilibre. M_{max} a été fixé à 300, et E, à 20. L'équation réelle pour l'échelle en logarithmes népériens, compte tenu des limites fixées, était donc:

$$P = 244{,}72 - 43{,}43 \ln (M - 20) \quad (16)$$

Cette échelle est représentée à la figure 5. Elle a comme principal avantage que le dessèchement journalier est indépendant de la valeur de l'indice.

Phase de pluie

Les équations pour la phase de mouillage de l'IH reposent sur deux principes:

1) L'augmentation de la teneur en eau par unité de grandeur de la pluie est inversement proportionnelle à la quantité de pluie tombée.
2) Plus la teneur initiale en eau est élevée, moins l'effet de mouillage de la pluie est grand.

En d'autres mots, la couche d'humus retient une plus grande fraction d'une pluie légère que d'une pluie forte, et plus l'humus est mouillé, moins il peut absorber de pluie. Même s'il a été démontré dans le travail original que la durée de la pluie avait un effet, on a décidé de ne pas compliquer les calculs et de ne pas en tenir compte. Dans l'IH, la quantité réelle de pluie, r_e, est fonction de la quantité totale de pluie, r_o:

$$r_e = 0{,}92\, r_o - 1{,}27 \text{ pour } r_o > 1{,}5 \quad (17)$$

où r_e est la quantité nette de pluie, et r_o, la quantité mesurée à découvert. À remarquer qu'il n'est pas tenu compte des pluies de 1,5 mm ou moins pour l'IH; de plus, les équations 17 et 18 ne sont utilisées que si r_o est supérieur à 1,5 mm. La teneur en eau après une pluie (M_r) est fournie par l'équation suivante:

$$M_r = M_o + 1000\, r_e/(48{,}77 + b r_e) \quad (18)$$

Le coefficient b a d'abord été exprimé sous forme d'une courbe, puis a été défini en fonction de l'indice initial P_o par un jeu de trois équations empiriques s'appliquant selon la valeur de P_o:

$$b = 100/(0{,}5 + 0{,}3\, P_o) \text{ pour } P_o \leq 33 \quad (19a)$$
$$b = 14 - 1{,}3 \ln P_o \text{ pour } 33 < P_o \leq 65 \quad (19b)$$
$$b = 6{,}2 \ln P_o - 17{,}2 \text{ pour } P_o > 65 \quad (19c)$$

Phase de dessèchement

La phase de dessèchement de l'IH est décrite à l'aide de deux équations et d'une petite table, lesquelles reposent sur les points suivants:

1) La courbe du dessèchement journalier est exponentielle pour les périodes où le temps est constant.
2) La couche d'humus brut a une teneur en eau à l'équilibre (E) constante, soit de 20 %.
3) La vitesse de dessèchement logarithmique (K) est proportionnelle à la température et devient négligeable à environ -1 °C.
4) La vitesse de dessèchement logarithmique est proportionnelle au déficit d'humidité relative.
5) La longueur de la journée, qui varie avec les saisons, a un effet à peu près proportionnel au nombre d'heures entre le lever et le coucher du soleil moins trois.

La vitesse de dessèchement logarithmique (K) est donnée par l'équation:

$$K = 1{,}894\,(T + 1{,}1)(100 - H)\, L_e \times 10^{-6} \quad (20)$$

où L_e est un coefficient pour la longueur du jour, déterminé empiriquement, dont la valeur mensuelle est indiquée au tableau 2. L'IH du jour peut alors être calculé à l'aide de l'équation:

$$P = P_o \text{ (ou } P_r) + 100K \quad (21)$$

où K est multiplié par 100 pour obtenir les valeurs correspondant à l'échelle choisie.

Tableau 2. Coefficient pour la longueur du jour (L_e) dans l'indice de l'humidité de l'humus

Mois	L_e	Mois	L_e
Janvier	6,5	Juillet	12,4
Février	7,5	Août	10,9
Mars	9,0	Septembre	9,4
Avril	12,8	Octobre	8,0
Mai	13,9	Novembre	7,0
Juin	13,9	Décembre	6,0

Indice de sécheresse

Historique

L'indice du combustible léger n'est représentatif que de la mince couche de surface formée de matières à dessèchement rapide, et l'indice de l'humus, que des horizons organiques de profondeur et de masse anhydre modérées. Cependant, le danger de feu est aussi fonction de l'état des horizons organiques plus profonds qui sont communs dans bien des parties du Canada, des quantités de gros débris de bois au sol et même de la quantité d'eau présente dans les petits cours d'eau et les marécages. Par conséquent, il a été décidé d'employer un troisième indice s'appliquant au combustible à dessèchement très lent pour le calcul de l'IFM et d'appeler cet indice «indice de sécheresse».

L'indice de sécheresse (IS) a d'abord été élaboré par Turner (1966). Il devait servir d'indice de la quantité d'eau emmagasinée dans le sol plutôt qu'a suivre la teneur en eau d'un combustible forestier particulier à dessèchement lent. Comme le sol se dessèche de façon exponentielle, il est particulièrement apte à représenter certains combustibles lourds. Muraro et Lawson (1970) ont établi que l'IS suivait assez bien les variations de la teneur en eau des couches profondes et compactes d'humus dans l'île de Vancouver. En moyenne, ces couches sont à environ 18 cm de profondeur et pèsent 25 kg (masse anhydre) par mètre carré. Les vitesses de dessèchement, mesurées pour des couches profondes d'humus de nature similaire sous une forêt de sapin baumier à Petawawa et sous une forêt d'épinette noire de hautes terres dans le nord du Québec, s'accordaient bien également avec l'IS (Van Wagner, 1974). L'une des fonctions d'un indice d'humidité changeant lentement, tel l'IS, est de signaler les occasions où les couches inférieures d'humus peuvent être plus sèches que les couches supérieures. Muraro et Lawson (1970), ainsi que Kiil[1] ont fait état d'études sur le terrain sur ce phénomène qui est à l'origine de feux persistants couvant en profondeur même si le comportement du feu peut ne pas être grave en surface.

Dans sa forme première, l'IS portait le nom d'indice d'humidité emmagasinée (IHE) et était exprimé directement en centièmes de pouce d'eau, jusqu'à un maximum de 800, c'est-à-dire 8 pouces d'eau. Pour suivre le modèle de l'IH, l'IHE a été exprimé sous forme logarithmique, ses valeurs augmentant avec le dessèchement. Une brève description mathématique de l'IS est donnée ci-après; une description complète a été faite par Turner (1972).

Échelle

L'échelle de l'IHE (forme originale de l'IS) allait de 0 à 800 (800 représentant le point de saturation, et 0, la condition la plus sèche normalement rencontrée). L'équation requise pour la

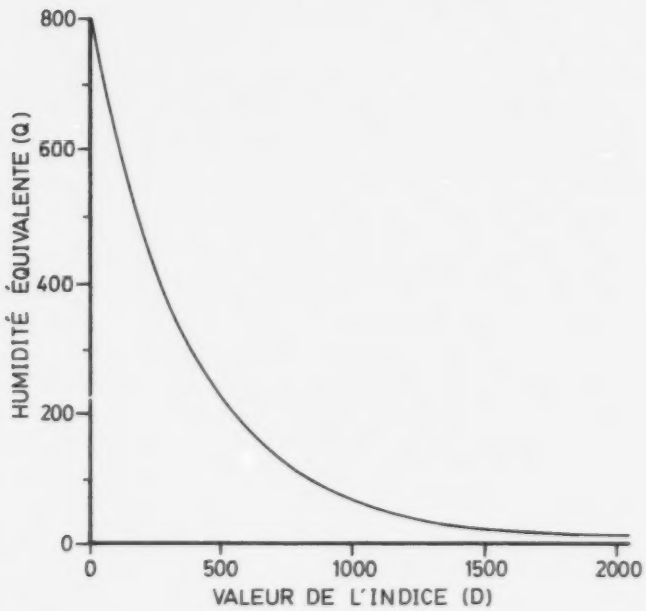


Figure 6. Graphique de l'échelle des valeurs de l'IS en fonction de son humidité équivalente (Q).

[1]Kiil, A.D. 1970. Distribution of moisture in spruce-fir duff and its relevance to fire danger rating. Can. Forest. Serv., Northern Forest Res. Centre Internal Rep. A-34.

nouvelle échelle logarithmique était semblable à celle pour l'IH. Il s'agit d'une fonction exponentielle dépendant de l'humidité équivalente (Q); cette équation est la suivante:

$$D = 400 \ln (800/Q) \quad (22)$$

où D est l'IS. La constante 400 représente la teneur maximale théorique en eau du combustible représenté par l'IS. Comme dans le cas de l'IH, avec ce genre d'échelle, le dessèchement journalier qui s'ajoute est indépendant de la valeur de l'IS (figure 6).

Phase de pluie

On détermine d'abord la quantité de pluie (précipitation) réelle (r_d), puis on ajoute simplement celle-ci à l'humidité équivalente du jour (Q_o), pour obtenir Q_r, l'humidité équivalente après la pluie. Les deux équations sont:

$$r_d = 0{,}83\, r_o - 1{,}27 \text{ pour } r_o > 2{,}8 \quad (23)$$

et $$Q_r = Q_o + 3{,}937 r_d \quad (24)$$

Il n'est pas tenu compte dans l'IS des pluies de 2,8 mm ou moins; par conséquent, les équations 23 et 24 ne sont utilisées que si r_o dépasse 2,8 mm.

Phase de dessèchement

Par temps sec, les additions journalières à l'IS représentent en réalité l'évapotranspiration potentielle (V), qui est donnée par l'équation suivante, établie empiriquement, qui dépend de la température à midi et de la saison:

$$V = 0{,}36 (T + 2{,}8) + L_f \quad (25)$$

Le correctif saisonnier pour la longueur du jour (L_f), aussi appelé «coefficient de la longueur du jour», est donné, pour chaque mois, au tableau 3. Comme la longueur de l'échelle de l'IS est, pour ainsi dire, la moitié de celle de l'échelle de l'IHE (équation 22), la valeur de V est réduite de moitié et ajoutée à l'indice initial (de la veille) de symbole D_o (ou, s'il y a pluie, à D_r). L'indice du jour même est donc donné par l'équation suivante:

$$D = D_o \text{ (ou } D_r) + 0{,}5\, V \quad (26)$$

Précipitations hivernales

Le recul de l'IS, de 52 jours aux conditions météorologiques normales, est assez long pour que la quantité des précipitations au cours de l'hiver puisse avoir un effet sur la valeur de départ pour la saison. En d'autres mots, la supposition que la neige fondante sature toujours la couche de combustible considérée par l'IS peut ne pas toujours être valable. Selon la méthode de Turner et Lawson (1978), la valeur de départ de l'IS se calcule au moyen de l'équation:

$$Q_s = a\, Q_f + b\, (3{,}94 r_w) \quad (27)$$

où Q_f est la valeur finale de l'humidité équivalente à l'automne (valeur finale de D d'après l'équation 22), r_w la précipitation au cours de l'hiver en millimètres, Q_s, la valeur de départ au printemps de l'humidité équivalente, et a et b sont des constantes. La valeur de D correspondant à Q_s peut ensuite être calculée au moyen de l'équation 22. Cette étape fait maintenant partie intégrante du calcul de l'IS. Les valeurs de a et de b sont fixées d'après le jugement de chaque organisme et de ses conseillers. Par expérience, un correctif pour la période hivernale n'est presque jamais nécessaire dans l'est du Canada, mais il l'est parfois dans certaines régions de l'Ouest, comme le décrit, par exemple, Alexander (1982).

Tableau 3. Coefficient pour la longueur du jour (L_f) dans l'indice de sécheresse

Mois	L_f
Novembre à mars	−1,6
Avril	+0,9
Mai	3,8
Juin	5,8
Juillet	6,4
Août	5,0
Septembre	2,4
Octobre	0,4

Échelle de la méthode de l'Indice Forêt-Météo

L'échelle de l'ancien indice canadien de danger d'incendie appelée ici «échelle D», allait de 0 à 16. Cette échelle n'était toutefois pas uniforme dans tout le Canada, puisque les neuf versions régionales de la méthode, avec les mêmes données météorologiques, pouvaient donner des valeurs différentes pour l'indice. À part le fait qu'on souhaitait un indice national uniforme, on avait trois autres raisons de vouloir une nouvelle échelle:

1) Dans certaines régions, l'échelle D n'était pas assez longue pour couvrir toute la gamme possible des conditions relatives aux incendies.
2) Une échelle plus longue permettrait des valeurs plus élevées pour des dangers d'incendie plus grands.
3) Il n'existait aucune interprétation des valeurs de l'échelle D en fonction des unités physiques d'intensité des feux.

Par ailleurs, on a décidé de conserver un lien entre l'ancienne échelle et la nouvelle, lien qui existerait tant sur le plan conceptuel que concrètement, c'est-à-dire qui serait exprimable par une équation.

La première étape a été d'exprimer les valeurs de l'échelle D en fonction du comportement du feu, de préférence l'intensité du feu au front donnée par la quantité d'énergie produite par unité de temps et par unité de longueur du front (d'après Byram, 1959). Grâce au programme de feux expérimentaux de Petawawa, il y avait quelque 22 feux réalisés dans des peuplements de pin pour lesquels on connaissait l'indice de feu et on pouvait calculer l'intensité. Certains de ces feux avaient été allumés dans un peuplement de pin gris, d'autres, dans un peuplement de pin rouge et de pin blanc, et d'autres encore, dans une plantation de pin rouge. Les données sur tous ces feux ont été reportées sur papier semi-logarithmique, donnant un graphique du logarithme de l'intensité en fonction de l'indice de danger d'incendie selon l'échelle D (figure 7); à la figure 7, la courbe de l'échelle est prolongée au-delà de sa limite normale de 16. (On a utilisé pour ce travail et le travail subséquent d'élaboration de l'échelle l'unité d'intensité du système anglo-saxon, le BTU par pied-seconde; pour fins de comparaison, l'échelle pour l'unité correspondante dans le SI, le kilowatt par mètre, est représentée à la figure 7.) La disposition des points ainsi obtenue donnait d'assez bonnes raisons de supposer que la relation entre l'échelle D et l'intensité du feu était une simple fonction logarithmique, suivant la ligne discontinue de la figure 7.

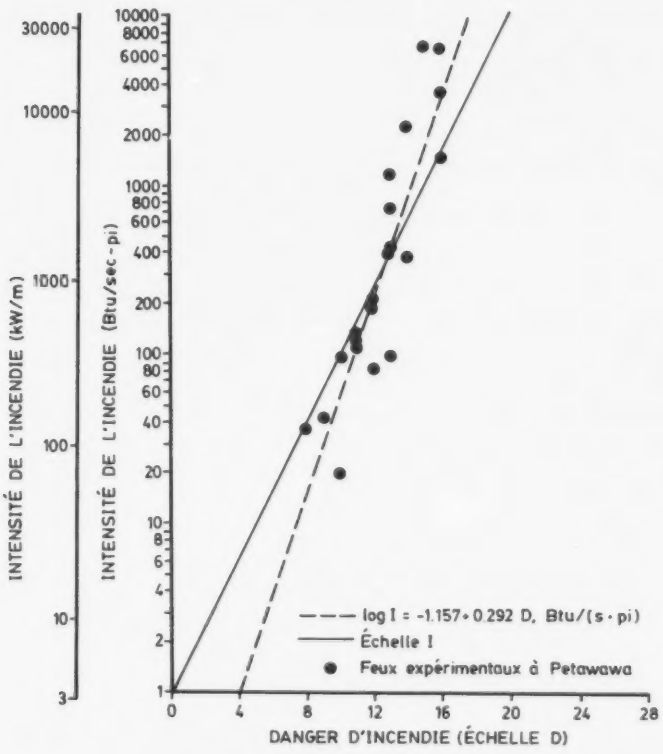


Figure 7. Graphique de l'échelle I et de l'intensité de feux expérimentaux en fonction des valeurs de l'échelle D.

La ligne devait cependant être modifiée pour qu'une interprétation généralisée de l'échelle D en fonction de l'intensité puisse être donnée, car:

1) les trois feux les plus intenses, à la figure 7, étaient dans la plantation de pin rouge, type de combustible jugé plus inflammable que le type dit «normal»; la partie supérieure de la ligne devait donc être déplacée vers la droite; et
2) un 0 dans la classification canadienne du danger d'incendie correspond traditionnellement à des conditions assez humides pour empêcher tout début ou toute propagation d'incendie, même pour les combustibles les plus inflammables; la ligne requise devait donc passer par le zéro de l'échelle, et la partie inférieure de la ligne, être déplacée vers la gauche.

La ligne continue de la figure 7, qui rencontre la ligne discontinue à un niveau d'intensité modéré et donne 1 BTU/(pi-s) au zéro de l'échelle D, est appelée «échelle I» et forme le lien entre la nouvelle méthode de classification du danger et l'ancienne. Un autre avantage de cette modification est que la proportion des 0 peut être maintenue inférieure à un niveau raisonnable, disons 20 % des jours, aux endroits où les conditions climatiques sont moyennement propices aux incendies.

En outre, il a été décidé que la nouvelle échelle ne serait pas limitée au sommet, étant donné que ses valeurs sont fonction de l'intensité du feu au front et ne représentent pas un pourcentage ou une fraction de quelque pire situation imaginée. Donc, aussi élevé que puisse être l'IFM, il peut toujours augmenter si les conditions s'aggravent. Il n'y a pas de limite artificielle comme dans l'ancienne méthode.

Par ailleurs, les valeurs de l'échelle I (BTU/[pi-s]) ont été jugées trop élevées et trop peu pratiques pour servir directement, et on a cherché une fonction qui réduirait cette échelle. On a d'abord choisi d'utiliser simplement la racine carrée de l'échelle I, appelée «échelle B», et, de là, on a construit les autres équations requises pour calculer l'IFM. On s'est aperçu par la suite que l'échelle B présentait deux inconvénients. D'abord, elle devait être prolongée au-delà de la limite de 16 de l'échelle D, partie pour laquelle il n'existait pas d'estimations fiables de l'intensité des feux; de plus, dans cette partie, l'échelle B donnait des valeurs très élevées, de l'ordre de plusieurs centaines, autrement dit assez peu proportionnées avec la partie inférieure de l'échelle. En outre, en bas de 10, les valeurs obtenues étaient inférieures à celles de l'échelle D, ce qui n'était pas du tout conforme à l'idée d'une échelle plus ouverte. Une autre échelle, appelée «échelle S», a donc

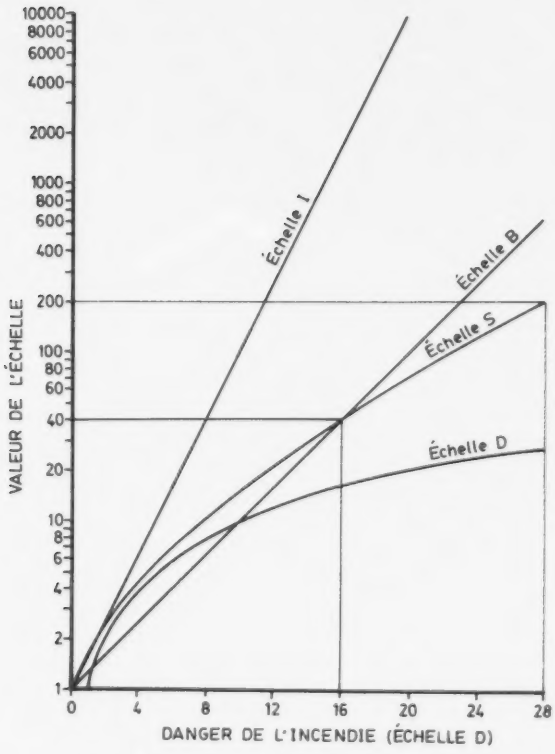


Figure 8. Courbes des valeurs de quatre échelles de danger (I, B, S et D) en fonction des valeurs de l'échelle D, indiquant les deux points de base de l'échelle S.

été élaborée. Au 16 de l'échelle D, on a fait correspondre une valeur de 40 et au 28, une valeur de 200. Les valeurs de l'échelle S sont toujours plus élevées que les valeurs correspondantes de l'échelle D; elles dépasseront à l'occasion 100 au Canada, mais il est presque certain qu'elles n'atteindront jamais 200. L'IFM a été formulé suivant cette échelle dont la courbe est représentée, avec celle des échelles I, B et D, à la figure 8.

Les équations de ces diverses échelles sont les suivantes:

$$I = 10^{0,2D} = e^{0,461D} \quad (28)$$

$$B = 10^{0,1D} = I^{0,5} = e^{0,230D} \quad (29)$$

$$\ln S = 0,614\, D^{0,647} = 1,587\, (\ln B)^{0,647} = 1,013\, (\ln I)^{0,647} \quad (30)$$

À remarquer que toutes ces équations sont pour l'échelle I en BTU/(pi-s). Les deux équations qui suivent permettent les conversions entre l'échelle S et l'échelle I lorsque l'intensité du feu est donnée en kilowatts par mètre, unité actuellement acceptée.

$$\ln S = 1,013\, [\ln(0,289\, I)]^{0,647} \quad (31)$$

$$\ln (0,289\, I) = 0,980\, (\ln S)^{1,546} \quad 32)$$

Les équations 28 à 32 expriment un rapport officiel mais assez artificiel entre les échelles de danger et l'intensité des feux. En particulier, le rapport pour l'intensité devrait être réétalonné pour chaque type de combustible lorsqu'on dispose de suffisamment de données sur le comportement du feu.

Indice de propagation initiale

Historique

Il aurait été facile de combiner les trois indices d'humidité et le vent (en raison de ses effets directs sur le feu) en une longue équation qui donnerait directement l'IFM de chaque jour. Si l'on a préféré passer par trois étapes, c'est, premièrement, qu'il n'aurait pas été pratique d'établir une seule table pour la détermination manuelle de l'IFM à partir des quatre paramètres considérés et, deuxièmement, que les composantes intermédiaires peuvent aider à présenter une vue complète des conditions de chaque jour.

La première des deux composantes intermédiaires est l'indice de propagation initiale (IPI), qui est représentatif des effets de la vitesse du vent et de la teneur en eau du combustible léger sur la propagation du feu. Sa première fonction étant de servir d'intermédiaire dans la détermination de l'IFM, il a été élaboré dans cette optique. Il doit le nom d'«indice de propagation» à ce qu'on croyait que la vitesse de propagation d'un incendie dépendait surtout de la vitesse du vent et de la teneur en eau du combustibie léger. Par ailleurs, comme il ne faisait aucun doute que la quantité totale de combustibles disponibles pouvait influer sur la vitesse de propagation d'un feu établi, on a ajouté l'adjectif «initiale». Autrement dit, le nom de l'indice n'a pas tant rapport au comportement d'un incendie au stade initial, peu de temps après qu'il a pris naissance, qu'à la vitesse de base à laquelle l'incendie se propage lorsque le combustible léger est sec, mais que le dessèchement en profondeur n'est pas très avancé. Pour établir l'IPI, on a déterminé séparément les fonctions rendant compte des effets du vent et de la teneur en eau du combustible léger sur la propagation du feu avant de les combiner et de les ajuster à l'échelle choisie.

Effet du vent

Lorsqu'on a commencé à étudier la fonction devant rendre compte de l'effet du vent, on a constaté l'absence d'une théorie générale expliquant l'effet du vent sur les incendies de forêt pour toute la gamme d'intensité des feux. Le choix d'une fonction devenait donc une question de jugement, et divers genres de données ont été examinées, y compris la documentation sur les effets du vent dans les méthodes d'évaluation du danger de l'Australie, des États-Unis et du Canada (ancienne méthode), les résultats de plusieurs études en laboratoire, ainsi que les données sur la série de feux expérimentaux portant sur le pin gris qui ont été réalisés à Petawawa. Certaines de ces données ont été reportées sur des graphiques et ont été décrites par Simard[1]. Nous avons reproduit à la figure 9 quelques exemples de courbes, tracées sur papier semi-logarithmique, de la vitesse (ou de l'indice) de propagation en fonction de la vitesse du vent, soit une courbe pour les feux dans les eucalyptus en Australie (McArthur, 1967), une courbe de l'indice de propagation américain reposant sur les tables de Nelson (1964), une courbe pour les feux dans le nord-est des États-Unis (U.S. Forest Service, 1958) et une courbe établie à partir des tables canadiennes de Beall (1948). Les valeurs de l'indice calculées selon l'ancienne méthode canadienne ont été ramenées à l'échelle B avant d'être reportées sur les graphiques. Il est ressorti du traitement de Simard, comme à la figure 9, que la plupart des courbes avaient une forme à peu près exponentielle.

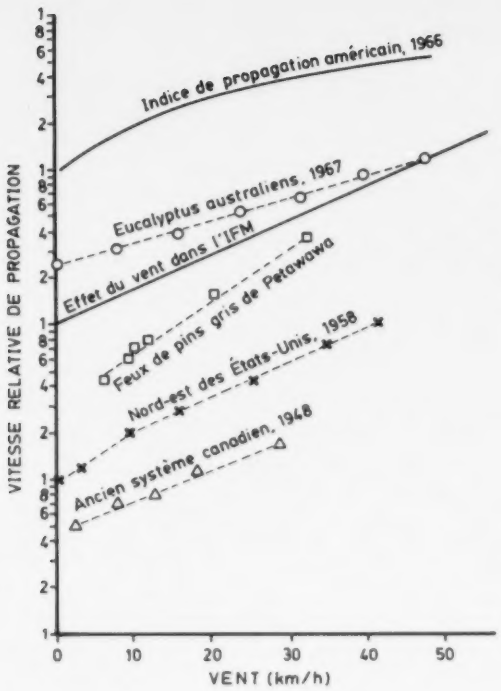


Figure 9. Effet de la vitesse du vent sur la vitesse relative de propagation dans l'IPI ainsi que les effets du vent indiqués par cinq sources. (La forme et la pente des courbes sont importantes, mais pas leur position relative.)

Avant de pouvoir choisir la fonction pour le vent, on devait définir les conditions d'exposition auxquelles correspondrait l'échelle du vent. On a examiné les modes de mesure du vent des méthodes figurant à la figure 9, de même que les données de Simard (1971), lequel avait comparé les vents mesurés aux aéroports aux vents mesurés aux stations de météorologie forestière. Dans l'ensemble les données favorisaient fortement la norme internationale de 10 m à découvert, norme qui fut adoptée. Les vents mesurés à 1,2 m du sol en forêt lors des feux dans des pins gris à Petawawa ont été multipliés par 5 pour les besoins de la figure 9. (Le choix de ce facteur repose sur une étude de la vitesse locale du vent à différentes hauteurs.)

La fonction choisie pour l'effet du vent, f(W), est une fonction exponentielle simple:

$$f(W) = e^{0.05039W} \qquad (33)$$

où W représente la vitesse du vent à découvert à 10 m, en kilomètres par heure. L'IPI ainsi défini double avec chaque augmentation de 14 km/h de la vitesse du vent (figure 9). Cette fonction traduit assez bien les effets du vent sur les incendies de forêt qui sont décrits dans plusieurs études publiées et correspond aussi assez bien avec les données obtenues lors d'expériences locales sur le terrain. Elle reste, néanmoins, essentiellement empirique, et sa validité est incertaine aux vitesses très élevées.

Effet de l'humidité du combustible léger

L'équation rendant compte de l'humidité du combustible léger (HCL) dans l'IPI a été établie par analyse de l'effet de l'HCL dans l'ancienne méthode d'évaluation du danger d'incendie. Comme dans le cas du vent, après une étude poussée de la documentation, on a jugé qu'il n'existait pas encore de théorie générale acceptable concernant l'effet de l'HCL sur la propagation des feux. Contrairement au cas précédent, toutefois, on pouvait compter sur les données qui avaient été recueillies pendant plusieurs décennies par les chercheurs du Service canadien des forêts sur l'effet de l'HCL sur le comportement des feux expérimentaux.

[1]Simard, A.J. 1968. Relative spread index. Progr. Rep. 2. Can. Dep. For. Rural Develop., Forest Fire Res. Inst., Ottawa.

Pour établir la fonction définissant l'effet de l'HCL, f(F), on a reporté sur des graphiques les indices de dangers obtenus l'été pour les neuf versions de l'ancienne méthode en fonction de la teneur en eau du combustible léger, pour plusieurs niveaux de l'ancien indice de sécheresse. La courbe moyenne de l'indice dans l'échelle B pour un niveau de sécheresse modéré (15) a été tracée, puis elle a été légèrement modifiée après consultation. La courbe ainsi obtenue a la forme d'une ligne descendante assez droite sur papier semi-logarithmique, avec une valeur quatre fois plus élevée à une teneur en eau du combustible léger de 6 % qu'à 16 %; elle s'aplatit graduellement au-delà de 16 %. Elle est représentée à la figure 10, avec une courbe australienne tirée de McArthur (1967), une courbe américaine établie par l'U.S. Forest Service (1966) et une courbe pour l'ancienne méthode canadienne (Forestry Branch, 1957). L'équation choisie, établie empiriquement avec un ajustement raisonnable, est la suivante:

$$f(F) = (91{,}9\, e^{-0{,}1386m})\,[1 + m^{5{,}31}/(4.93 \times 10^{7})] \qquad (34)$$

où m représente la teneur en eau du combustible léger en pourcentage suivant l'équation 2b. Le deuxième terme à droite de l'équation 34 a été modifié légèrement par rapport à sa forme originale afin que l'IPI reste compatible avec l'ICL, dont les modifications ont déjà été décrites.

Équation

L'équation de l'IPI est simplement le produit de l'équation pour le vent multipliée par celle pour l'humidité du combustible léger et par une constante de référence, 0,0208. Cette constante, déterminée plus tard, a été calculée de manière à rendre l'IFM dans l'échelle B égal à 40 pour un ensemble arbitraire de conditions pour lesquelles l'indice de la côte de la Colombie-Britannique était de 16 selon l'ancienne méthode. Ces conditions sont les suivantes:

Vitesse du vent – 13 km/h
Teneur en eau du combustible léger – 6 %
Ancien indice de sécheresse – 25

La constante ainsi calculée (0,0208) a été multipliée par 10 afin que la gamme des valeurs de l'IPI soit pratique. L'équation est ainsi devenue:

$$R = 0{,}208\, f(W)\, f(F) \qquad (35)$$

où R représente l'indice de propagation initiale.

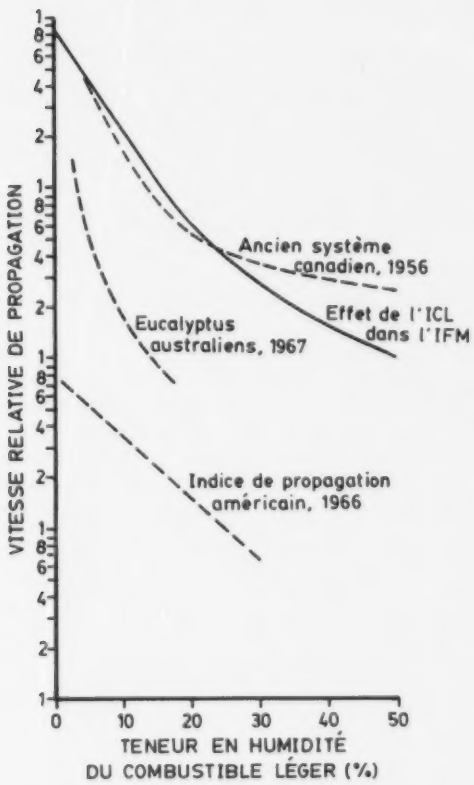


Figure 10. Effet de l'humidité du combustible léger (HCL) sur la vitesse relative de propagation dans l'IPI ainsi que les effets indiqués par trois sources. (La forme et la pente des courbes sont importantes, mais pas leur position relative.)

Indice du combustible disponible

Le second des deux indices intermédiaires à partir desquels est calculé directement l'IFM est l'indice du combustible disponible (ICD), qui correspond à l'ancien indice rectifié de l'humus; il représente la combinaison de l'indice de l'humus (IH) et de l'indice de sécheresse (IS). Lorsqu'il fut décidé d'introduire l'IS dans le nouveau système, on a cherché un moyen de lui donner un poids variable, limité, de manière à réserver l'effet principal pour l'IH. Ainsi, lorsque l'IH est près de 0, l'IS, aussi élevé qu'il puisse être, ne devrait pas influer sur le danger d'incendie de ce jour. La fonction qui répond le mieux à ces exigences est celle de la moyenne harmonique.

Avant de pouvoir combiner l'IH et l'IS, on devait rendre leurs échelles équivalentes quant au rythme moyen d'augmentation par temps sec. Comme les conditions météorologiques mesurées à midi entraînent des augmentations journalières différentes de chaque indice, on devait procéder de façon empirique. On a donc calculé la moyenne des augmentations journalières de chaque indice pour trois saisons en prenant les jours sans pluie de juin, de juillet et d'août. Pour les conditions météorologiques de Petawawa, on a déterminé que l'augmentation journalière moyenne de l'IS était 2,5 fois plus élevée que celle de l'IH, et on a adopté ce rapport. On doit donc multiplier l'IS par 0,4 avant de calculer la moyenne harmonique (c'est-à-dire l'ICD).

Le comportement relatif de l'IH et de l'IS réduit est habituellement le suivant. Au printemps, lorsque commencent les calculs, les deux indices augmentent ensemble jusqu'à la première pluie. Étant donné que l'IH diminue davantage sous l'effet de la pluie, l'IS reste comparativement plus élevé après chaque pluie. Alors que l'IH peut fluctuer plusieurs fois au cours d'une saison entre des niveaux élevés et bas, l'IS a tendance à monter graduellement pendant la partie chaude de la saison et à baisser lorsque revient le temps froid. L'IS réduit est donc presque toujours plus élevé que l'IH. Du fait de la nature de la moyenne harmonique, l'IH, plus faible, se voit accorder plus de poids.

La moyenne harmonique des deux variables a et b est $2ab/(a + b)$. Lorsque l'IH et l'IS réduit sont combinés de cette manière, l'ICD est donné par:

$$U = 0{,}8\ PD/(P + 0{,}4\ D) \text{ pour } P \leq 0{,}4\ D \qquad (36)$$

où U représente l'ICD, P, l'IH, et D, l'IS. L'ICD ainsi défini a les propriétés suivantes:

1) Lorsque l'IH est égal à 0, l'ICD est également égal à 0, quelle que soit la valeur de l'IS.
2) La pondération proportionnelle de l'IS est variable, augmentant à mesure que le rapport de l'IH sur l'IS s'approche de 1.
3) Sauf lorsque l'IH est égal à 0, l'ICD est toujours plus élevé que l'IH seul, mais il n'est jamais plus que deux fois plus élevé.
4) Après chaque pluie, l'ICD augmente plus rapidement que l'IH. Plus l'IS est élevé par rapport à l'IH, plus l'ICD revient vite à une valeur antérieure donnée.
5) Étant donné que l'IS a tendance à augmenter au cours de tout l'été, l'ICD a un léger effet saisonnier, c'est-à-dire que pour une séquence donnée de conditions météorologiques journalières, les valeurs de l'ICD sont habituellement plus élevées à l'automne qu'au printemps.

Le facteur humidité de l'humus

Pour que l'Indice Forêt-Météo puisse servir de mesure de l'intensité des feux, il doit comporter des facteurs qui rendent compte de la vitesse de propagation et de la quantité de combustibles brûlés. L'IPI est représentatif de la vitesse de propagation, mais l'ICD est simplement la combinaison de deux indices de la teneur en eau de combustibles et il en garde la forme fondamentale, soit une fonction logarithmique de la teneur en eau. Il fallait donc trouver une fonction permettant de transformer l'ICD en une mesure de la masse des combustibles brûlés. On a procédé de la manière décrite ci-dessous.

Là encore, cette fois, à défaut d'une théorie générale expliquant comment la proportion des combustibles disponibles pour la combustion augmente avec le dessèchement, la fonction cherchée a été déterminée principalement par analyse d'un effet analogue dans les données de l'ancienne méthode. Les valeurs d'été des indices de danger des neuf versions de celle-ci ont été reportées sur un graphique en fonction des valeurs de l'ancien indice de sécheresse, et ce pour diverses teneurs en eau du combustible léger, toutes les valeurs ayant d'abord été transformées suivant les échelles de la nouvelle méthode. Ainsi, on a converti les valeurs de l'ancien indice de l'échelle D a l'échelle B au moyen de l'équation appropriée pour le changement d'échelle et on a calculé les valeurs de l'IH correspondant aux valeurs de l'ancien indice de sécheresse (DRI) à l'aide de l'équation suivante:

$$IH = 13{,}0 + 2{,}92\ DRI \qquad (37)$$

(Pour arriver à cette équation, on a reporté sur un graphique les valeurs locales de l'IH pour les mois de juin, juillet et août de trois années en fonction des valeurs correspondantes de l'ancien indice de sécheresse. La courbe des valeurs moyennes de l'IH est une ligne assez droite en dépit du grand intervalle des valeurs de l'IH correspondant à chaque valeur de l'ancien indice de sécheresse, ce grand intervalle étant dû à la structure différente des indices.)

Les graphiques transformés de l'ancien indice de danger en fonction de l'ancien indice de sécheresse donnaient des lignes assez droites, ayant tendance à converger en s'approchant de 0. On a calculé pour chaque droite le rapport de la valeur de l'indice (échelle B) pour DRI = 25 sur sa valeur pour DRI = 5 (IH = 86 et 28 respectivement), puis on a fait la moyenne, ce qui a donné 2,5. On a alors établi arbitrairement que la valeur de la fonction cherchée devait être égale à 10 pour IH = 28 et à 25 pour IH = 86. On a également donné une faible valeur à fonction pour IH = 0, pour les raisons suivantes.

L'IH et l'IS ne sont représentatifs que de deux catégories de combustibles à dessèchement lent. Cependant, comme la variable qui les représente dans l'équation de l'IFM constitue en réalité un facteur rendant compte de la consommation des combustibles, elle doit considérer tous les combustibles brûlés, tant ceux à dessèchement rapide que ceux à dessèchement lent. La faible valeur de la fonction pour IH = 0 représente donc la faible masse constante du combustible léger qui supposément brûle dans tout feu qui se propage le moindrement. À la suite de certains essais, cette faible valeur a été fixée à 2.

Les trois points établis (pour IH = 0, 28 et 86) formaient une légère courbe qui s'aplatissait en s'élevant et dont l'équation était $0{,}626\ P^{0.0809} + 2$.

Il y avait cependant une limite importante: cette équation avait été établie à partir de l'effet de l'ancien indice de sécheresse qui ne considérait que 25 jours sans pluie appréciable – disons 85 dans l'échelle de l'IH. Comme la nouvelle méthode d'évaluation du danger devait considérer des périodes sans pluie beaucoup plus longues, une certaine justification de l'extrapolation devait être apportée. Dans la version originale de l'IFM, on avait trouvé cette justification dans une théorie expliquant l'augmentation de la quantité d'humus disponible quand la teneur en eau diminue. Nous en donnons ici une brève description, un exposé détaillé en ayant déjà été fait ailleurs (Van Wagner, 1972c).

Si l'on suppose que le feu se propage par préchauffage et inflammation de la couche de combustible léger seulement (pesant, disons, 0,25 kg/m^2), tout humus brut qui contribue directement à l'intensité du feu au front doit donc prendre feu et brûler durant le passage du front. Pour ce, le feu doit transmettre sa chaleur vers le bas afin d'éliminer l'humidité et d'amener l'humus au point d'inflammation. Si l'on peut estimer la quantité d'énergie transmise vers le bas au front, de même que la quantité d'énergie nécessaire pour porter une masse unitaire d'humus humide au point d'inflammation, on peut calculer la masse de l'humus disponible comme combustible au front. Plusieurs hypothèses ont été posées afin de simplifier le plus possible la théorie. Une courbe a ensuite été tracée, laquelle s'est révélée correspondre très bien (relativement parlant) à la fonction déjà obtenue pour la gamme des valeurs de l'IH, au moins jusqu'à 200 (figure 11). Cette théorie, même si elle n'est pas totalement avérée, a permis d'offrir une explication rationnelle pour l'extrapolation souhaitée de la fonction f(D) rendant compte de l'humidité de l'humus. Enfin, même si la fonction a été calculée pour l'IH, c'est l'ICD qui est utilisé dans l'équation finale. L'équation pour la forme originale de la fonction f(D) est donc:

$$f(D) = 0{,}626U^{0.809} + 2 \qquad (38a)$$

La courbe théorique représentée à la figure 11 s'aplatit et atteint une valeur maximale à une valeur élevée de l'ICD, mais pas la courbe de la fonction choisie (équation 38a), la principale raison étant que la forme théorique ne pouvait pas être facilement adaptée à la forme de la courbe souhaitée aux valeurs faibles de l'ICD. Par la suite, on s'est aperçu qu'avec l'équation 38a l'IFM pouvait augmenter indéfiniment quand augmentait l'ICD, ce qui est contraire au principe qu'il y a une limite à la quantité de combustibles qui peuvent contribuer à l'intensité du feu au front dans la réalité. On a donc formulé une nouvelle équation qui s'applique lorsque l'ICD atteint 80, et la courbe ainsi définie a son maximum à f(D) = 40. L'IFM atteint maintenant 90 % de sa valeur potentielle lorsque l'ICD est égal à 160, et même si l'ICD augmentait à l'infini, l'augmentation correspondante de l'IFM ne pourrait pas dépasser 10 %. Une analyse des données de Van Wagner (1972a) sur la combustion de l'humus indique qu'à f(D) = 40, la consommation d'humus est d'environ 2,5 kg/m^2. Des quantités plus grandes peuvent brûler, mais on suppose que cela est attribuable au feu qui couve derrière le front principal. L'équation 38a est maintenant utilisée pour les valeurs de l'ICD jusqu'à 80; pour les valeurs supérieures, l'équation qui s'applique est:

$$f(D) = 1\,000/(25 + 108{,}64\, e^{-0.023U}) \text{ pour } U > 80 \qquad (38b)$$

Pour des considérations d'échelle, la courbe définie par cette équation a son maximum un peu au-dessous du maximum de la courbe théorique. Elle est également représentée à la figure 11.

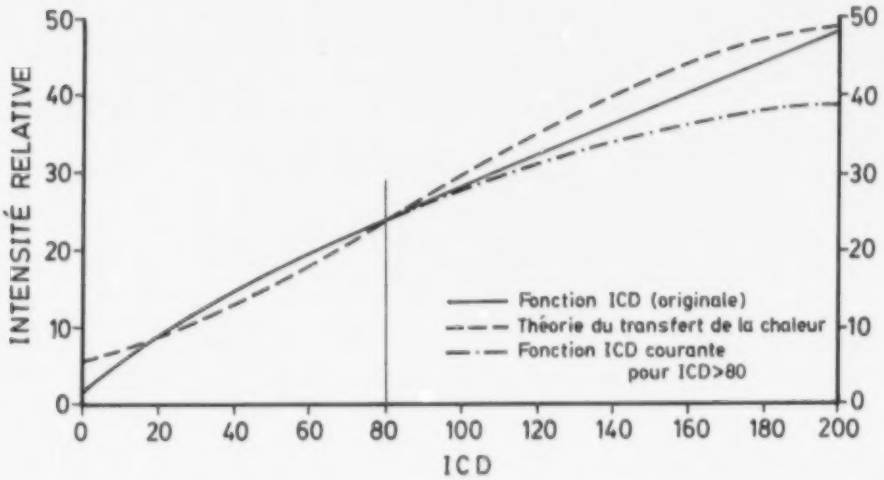


Figure 11. Effet de l'ICD sur l'intensité relative dans l'IFM, avec la nouvelle fonction pour les valeurs de l'ICD supérieures à 80 et la courbe reposant sur la théorie du transfert de la chaleur.

Équation

Nous avons maintenant toutes les équations requises pour le calcul de l'IFM. Le facteur rendant compte de l'humidité de l'humus est fourni par les équations 38a et 38b. La constante de référence, dont le mode de calcul a été examiné à la section portant sur l'IPI, fait déjà partie intégrante de l'IPI, mais comme elle avait été multipliée, pour des raisons pratiques, par 10, on doit rectifier la valeur de l'IPI en multipliant par 0,1. L'IFM dans l'échelle B s'exprime donc comme suit:

$$B = 0{,}1\ R\ f(D) \tag{39}$$

Enfin, pour obtenir sa valeur dans l'échelle S, on utilise l'équation suivante:

$$\ln S = 2{,}72\ (0{,}434 \ln B)^{0{,}647} \tag{40}$$

La dernière équation comporte une restriction: lorsque B est inférieur à 1, son logarithme est négatif et ne peut pas être porté à une puissance fractionnaire. Dans ce cas, S est simplement considéré comme égal à B. Enfin, il faut signaler que cette équation[1] donne des valeurs de plus en plus petites au fur et à mesure que baissent les indices d'humidité, mais qu'elle n'atteint jamais 0. Pour les besoins généraux, l'IFM et ses diverses composantes sont arrondis au nombre entier le plus près; on aura donc un 0 pour les valeurs inférieures à 0,5.

Indice journalier de sévérité

L'indice journalier de sévérité (IJS) est un indice optionnel dérivé de l'IFM. Il a été conçu originalement par Williams (1959) qui souhaitait une estimation de la difficulté de la lutte contre les incendies exprimée en fonction de l'ancien indice de danger d'incendie. Il avait été constaté que l'échelle qui convenait à l'évaluation du danger de feu n'était pas nécessairement adéquate lorsqu'il s'agissait d'évaluer le travail requis pour éteindre un feu. Cette non-correspondance était prononcée avec l'ancien indice et elle est encore considérable avec l'IFM. La formule de Williams (1959) a été adaptée à l'IFM par Van Wagner (1970b). L'IJS se calcule directement à partir de l'IFM à l'aide de l'équation:

$$IJS = 0{,}0272 S^{1{,}77} \tag{41}$$

Cette équation a pour effet évident de pondérer l'IFM de façon marquée à mesure que celui-ci augmente, d'une manière qui est censée refléter la difficulté de lutte contre l'incendie. L'IFM ne conviendrait pas pour le calcul des moyennes et il ne devrait être utilisé que comme valeur journalière. Pour les moyennes, qu'il s'agisse d'une moyenne spatiale pour une journée, calculée pour un certain nombre de stations, ou d'une moyenne pour une station, calculée pour une période donnée, il est préférable d'utiliser l'IJS.

La moyenne de l'IJS pour toute la saison des incendies est appelée «indice saisonnier de sévérité» (ISS). Elle est considérée comme un critère objectif de comparaison des saisons ou des régions quant à la gravité des conditions météorologiques relativement aux incendies. Cet indice, seul, ne donne pas cependant un reflet complet de l'activité saisonnière de lutte contre les incendies car celle-ci dépend également de la façon dont les incendies prennent naissance et des ressources disponibles pour leur extinction.

[1] Il s'agit de l'équation normale qu'il faut utiliser pour calculer l'IFM. Elle n'est pas identique à l'équation 30, qui a été établie plus tard avec une précision totale.

Utilisation de l'Indice Forêt-Météo

Calcul

Les indices de la méthode de l'IFM peuvent être déterminés soit par ordinateur, soit à l'aide de tables. La série normalisée d'équations constitue la base de la méthode. La plupart d'entre elles ont été utilisées dans la présente publication pour l'explication et la démonstration de la structure de celle-ci. La série complète a été donnée par Van Wagner et Pickett (1985); elle comprend plusieurs autres équations conçues pour accroître l'uniformité interne de façon mineure. Les tables qui ont déjà été publiées (Service canadien des forêts, 1984) ont été produites à partir de ces équations.

Plusieurs programmes informatiques ont été mis au point au cours des phases d'élaboration et d'utilisation de la méthode de l'IFM. Le premier a été conçu par Nikleva et Parent (1971). D'autres, par la suite, ont été produits par Simard (1970b), Engisch et Walker (1971), Kean (1975) et Kourtz (1980). L'actuel programme officiel (donné dans Van Wagner et Pickett, 1985) résout les équations en produisant les résultats les plus exacts possible mathématiquement; il ne comporte pas de contraintes artificielles à part celles qu'exigent certaines équations en raison de leur caractère empirique. Ce programme est conçu pour le traitement des données météorologiques d'une station au cours d'une saison, mais il comporte des sous-programmes qui permettent des comparaisons et peuvent être incorporés en blocs dans les programmes opérationnels exécutés chaque jour pour un certain nombre de stations.

Un problème pérenne mérite d'être mentionné. La façon traditionnelle de calculer les indices de danger de feu au Canada par les années passées était d'utiliser une série de tables; c'était la méthode normalisée. Par contre, la méthode de l'IFM repose sur des équations qui ne peuvent être résolues de façon pratique sans un ordinateur. Il est évidemment impossible de produire une série de tables qui fourniraient tout le temps des résultats qui correspondent exactement avec les résultats obtenus par ordinateur. On a fait beaucoup d'efforts pour rendre ces tables aussi exactes que possible et pour réduire au minimum le biais dans les résultats moyens obtenus à l'aide des tables, mais il est inévitable qu'il se glissera quotidiennement un certain degré d'erreur dans tous les indices. Actuellement, la plupart des organismes calculent les indices à une station déterminée et les communiquent par la suite aux stations individuelles. Toutefois, les tables sont encore très utilisées localement pour des déterminations rapides aussitôt que les conditions météorologiques ont été mesurées. Un organisme a alors deux choix: il peut adopter le résultat mathématique comme norme et demander aux stations de tenir un registre des résultats obtenus à l'aide des tables de manière à pouvoir ajuster ces résultats par comparaison avec les résultats obtenus par ordinateur. Il peut aussi introduire les tables dans l'ordinateur et établir que les résultats obtenus à l'aide des tables sont les résultats normalisés. Il s'agit d'établir une politique. De toute manière, il est entendu que chaque fois qu'une comparaison ou un calcul critique doit être effectué, les véritables résultats normalisés sont ceux qui sont fournis par les équations.

Comme la méthode de l'IFM utilise uniquement comme données de départ les conditions météorologiques et la date (le mois), les calculs pourraient tout aussi bien être faits avec les prévisions météorologiques pour donner une prévision du danger de feu. En collaboration avec le Service de l'environnement atmosphérique, la plupart des organismes s'occupant des incendies de forêt produisent maintenant de telles prévisions jusqu'à 24 heures avant les mesures qui doivent être prises à midi. Paul (1970), Pouliot (1974) et Nikleva (1975) ont décrit des méthodes opérationnelles alors applicables.

Interprétation

L'IFM a été conçu à l'origine pour représenter l'intensité du feu au front suivant la définition donnée par Byram (1959):

$$I = H\,W\,R \qquad (42)$$

où, en unités compatibles, H représente la chaleur de combustion, W, la masse des combustibles brûlés par unité de surface, R, la vitesse de progression, et I, le rythme de production d'énergie par unité de longueur du front.

En conséquence, l'échelle de l'IFM a été établie à partir d'un graphique des intensités de certains feux expérimentaux en fonction des valeurs de l'ancien indice de danger de feu (figure 7). En outre, l'IPI et l'ICD ont été conçus de manière à représenter les facteurs R et W, respectivement, dans l'équation de Byram. Il est connu que la chaleur de combustion (H) varie quelque peu suivant les espèces et la teneur en eau des combustibles, mais on l'a considérée comme étant constante pour des raisons pratiques. On peut donc estimer qu'elle est comprise dans la constante de référence (équation 35).

En raison de la distorsion créée lors de l'élaboration de l échelle S, l'IFM n'est évidemment pas directement proportionnel à l'intensité au front. En fait, une autre interprétation est possible. Comme nous pouvons le voir à la figure 8, la courbe de l'échelle S est dans un certain sens semblable à celle de la racine carrée des valeurs de l'échelle I, laquelle est représentative de l'intensité des feux. Cependant, on sait (Byram, 1959) que la longueur des flammes des feux de surface est également à peu près proportionnelle à la racine carrée de l'intensité. Par conséquent, on pourrait considérer que l'IFM est plus ou moins proportionnel à la longueur des flammes, ce qui offre un critère visuel utile pour l'évaluation du comportement d'un feu.

Vu le grand nombre d'effets dont il est tenu compte dans l'IFM, une même valeur de celui-ci peut être obtenue dans de nombreux contextes différents et pour beaucoup de combinaisons différentes de conditions météorologiques. Par exemple, l'un des trois indices de l'humidité des combustibles peut être relativement élevé ou bas par rapport aux deux autres. Premièrement, après une forte pluie, deux ou trois bonnes journées de dessèchement donnent un ICL élevé alors que l'IH reste bas. Deuxièmement, un temps chaud et humide ou une pluie légère après une longue période de sécheresse se traduisent par une faible valeur pour l'ICL tandis que l'IH reste élevé. Troisièmement, l'IS peut augmenter ou diminuer graduellement pendant que les deux autres indices connaissent des hausses et des baisses répétées. En raison d'une telle combinaison d'effets, un temps calme, chaud et humide, par exemple, après une période de sécheresse importante produira une valeur modérée pour l'IFM, et une journée de temps sec et venteux fera alors augmenter nettement cette valeur. L'IFM est beaucoup plus variable d'une journée à l'autre que l'ancien indice de danger en raison de l'effet plus prononcé (mais plus réaliste) du vent.

Tout ceci démontre l'impossibilité de donner une indication complète du danger d'incendie pour une journée donnée au moyen d'un seul chiffre. Les autres indices calculés dans la méthode de l'IFM sont nécessaires pour une compréhension complète des conditions. La méthode est comparable à une pyramide où l'IFM serait au sommet et où les autres indices seraient répartis sur les paliers inférieurs en nombre croissant plus on se rapproche de la base:

Sommet – l'IFM seul, qui rend compte au moyen d'un seul chiffre de tous les effets combinés du mieux possible.

Deuxième étage – l'IPI et l'ICD qui renseignent directement sur la vitesse de propagation et la quantité des combustibles brûlés.

Premier étage – l'ICL, l'IH, l'IS et la vitesse du vent, quatre variables indicatives des influences du dessèchement de surface et du vent sur la vitesse potentielle de propagation et du dessèchement à moyen et à long terme sur la quantité des combustibles qui pourraient brûler.

À un étage encore plus bas d'une telle pyramide, nous pourrions trouver les divers paramètres météorologiques considérés et, peut-être aussi, le nombre de jours depuis la dernière pluie. C'est précisément parce qu'il est impossible d'interpréter directement les données météorologiques de base que les méthodes d'évaluation du danger d'incendie existent. La méthode de l'IFM, qui tient compte des effets des conditions météorologiques antérieures et actuelles, permet une bien meilleure évaluation des conditions relatives aux incendies et du comportement potentiel des feux que ce qu'on obtient par la simple collecte des observations météorologiques. L'IFM, seul, convient pour l'information du public en général. L'IPI et l'ICD, donnés séparément, sont particulièrement recommandés pour les besoins généraux de la lutte contre les incendies, tandis que l'ICL, l'IH et l'IS sont utiles pour diverses utilisations spéciales. La vitesse du vent est le facteur météorologique de base qui présente immédiatement le plus d'intérêt direct. Un guide pour l'interprétation de la méthode de l'IFM a été rédigé par Lawson (1972); même s'il a été conçu plus spécialement pour la Colombie-Britannique il est généralement applicable aux autres parties du Canada. Son auteur a également produit un montage sonorisé de diapositives qui est utile pour les exercices de formation (Lawson, 1977).

Étalonnage

Dès que la méthode de l'IFM fut mise en application dans tout le Canada, on s'est beaucoup intéressé à la façon dont ses différentes composantes répondraient à divers aspects des incendies de forêt. Par étalonnage, on entend ici la corrélation des indices de la méthode avec les statistiques sur les feux et leur importance plutôt que la prévision du comportement d'un feu donné. Outre de nombreux tests faits simplement, des études rigoureuses à grande échelle ont été réalisées sur la performance de la méthode en Ontario, en Alberta et en Colombie-Britannique. Les données de nombreuses stations pour plusieurs années ont été analysées par Stocks (1971), Turner (1973), Stocks (1974) et Kiil et coll. (1977). De fortes tendances ont ainsi été mises en évidence en ce qui concerne les relations entre les incendies et la gravité des conditions météorologiques telle qu'indiquée par les indices de la méthode de l'IFM. Certains principes se dégagent de toutes ces analyses:

1) C'est avec l'ICL, qui mesure la teneur en eau du combustible léger de surface, que l'existence d'incendies présente une meilleure corrélation.
2) C'est avec l'IPI, qui mesure l'effet combiné du vent et de la teneur en eau du combustible léger, les deux facteurs les plus importants dans la propagation des incendies, que l'étendue des incendies est le mieux corrélée.
3) D'autres indices de la méthode peuvent présenter une bonne corrélation avec certaines caractéristiques des incendies, selon les facteurs mesurés par chacun. Ainsi, l'IFM est un bon indicateur de toutes les situations relatives aux incendies car il tient compte de tous les facteurs.
4) L'ICD est aussi un bon indicateur de la situation concernant les incendies pour la simple raison que le dessèchement en profondeur a une influence importante sur le comportement des feux. L'ICD renforce n'importe quel indicateur primaire.
5) Certaines corrélations peuvent paraître contradictoires, et il importe de donner une interprétation correcte pour chaque composante. Ainsi, l'étendue du feu peut être corrélée négativement avec l'IS. Si cela se produit, c'est parce que l'IS augmente lentement pendant tout le printemps et l'été et ne reflète pas la tendance habituelle qui veut que les conditions météorologiques les plus propices aux incendies soient enregistrées au début de la saison. L'utilisation de l'IS comme variable secondaire au lieu de variable primaire devrait corriger cette anomalie apparente.

Harrington et coll. (1983) ont effectué une vaste étude des corrélations entre les superficies brûlées au Canada et les composantes de la méthode de l'IFM en utilisant les mesures des conditions météorologiques faites à 41 stations canadiennes au cours de la période de 1953 à 1980. Les meilleures données disponibles sur les superficies incendiées étaient des totaux mensuels par province ou territoire. Les meilleures corrélations linéaires ont été obtenues avec l'IH et l'IJS (indice journalier de sévérité); toutefois, les valeurs obtenues pour R^2 n'étaient pas particulièrement élevées. La raison probable est que le danger d'incendie et la situation sur le plan des incendies peuvent varier considérablement au cours d'un mois donné et à l'intérieur d'une province donnée; par conséquent, les moyennes mensuelles (ou même les valeurs extrêmes) pour toute composante de la méthode peuvent présenter une faible corrélation avec les valeurs mensuelles pour la superficie incendiée. Que les meilleures corrélations aient été obtenues pour l'IH dans cette étude est probablement dû au fait que la période dont il est tenu compte dans cet indice reflète mieux le genre de tendance météorologique nécessaire pour produire de bonnes conditions de combustion suivant les données mensuelles.

Dans toutes les études d'étalonnage, l'analyse des résultats est compliquée par divers facteurs confusionnels, notamment la variation du nombre d'agents déclencheurs d'incendie sous différentes conditions météorologiques, la tendance de l'effort de lutte contre les incendies à varier selon le degré de danger d'incendie et la politique de lutte contre les incendies qui varie en fonction de la latitude à certains endroits. On doit toujours faire bien attention de bien interpréter les résultats. Ceci dit, l'efficacité de la méthode de l'IFM pour bien distinguer les différents degrés et aspects du danger d'incendie a été bien démontrée.

Finalement, l'étalonnage qu'on souhaite le plus établir pour un indice de danger d'incendie est avec l'effort de lutte nécessaire par unité de longueur du périmètre de l'incendie. Il n'existe encore aucune théorie valable établissant un rapport entre l'effort de lutte et des paramètres pertinents du comportement du feu, et le problème est compliqué par la diversité croissante des méthodes de lutte.

Classes de danger

Lorsque l'on communique les estimations du danger d'incendie, on donne habituellement la classe de danger soit en plus, soit à la place de la valeur de l'indice, surtout lorsqu'on s'adresse au public. Si l'échelle de l'IFM est uniforme à l'échelle du pays, la gamme des conditions météorologiques propices aux incendies ne l'est certes pas. Il est donc logique que chaque organisme reponsable d'un grand territoire établisse son propre système de classes de danger, fixant pour chacune de ces classes l'intervalle approprié de l'IFM suivant les caractéristiques des conditions propices aux incendies dans la région. Les classes de danger utilisées au Canada sont: très bas, bas, modéré, élevé, très élevé et extrême. Un organisme particulier utilisera ordinairement quatre ou cinq de ces six classes.

S.J. Muraro, du Centre de recherche forestière (maintenant de foresterie) du Pacifique, a proposé une méthode rationnelle pour l'établissement des classes. Premièrement, réunir un échantillon des valeurs historiques de l'IFM pour un certain nombre de saisons. Deuxièmement, décider du nombre de jours de danger extrême qu'il devrait y avoir chaque saison en moyenne et établir la limite inférieure de la classe extrême. Troisièmement, établir les valeurs pour les autres classes suivant une progression géométrique en utilisant l'échelle I et en appliquant un rapport constant d'une classe à l'autre pour l'établissement des valeurs dans l'échelle I. Enfin, convertir les valeurs dans l'échelle I à celles de l'échelle S de l'IFM.

Par exemple, supposons qu'un IFM de 30 ait été choisi comme limite inférieure de la classe de danger extrême. D'après l'équation 32, la valeur équivalente dans l'échelle I est 2 309. On calculera le rapport constant qui doit exister entre les classes (les six classes étant utilisées) en prenant la racine cinquième de 2 309, ce qui donne 4,706. En divisant successivement 2 309 par ce nombre on obtient les limites inférieures des cinq autres classes. On calcule les valeurs correspondantes de l'IFM dans l'échelle S à l'aide de l'équation 31, ce qui donne les intervalles suivants pour chaque classe:

Classe de danger	Limite inférieure dans l'échelle I	Intervalle de l'IFM
Extrême	2 309	30 et plus
Très élevé	491	17 – 29
Elevé	104	9 – 16
Modéré	22	5 – 8
Bas	4,7	2 – 4
Très bas	1,0	0 – 1

Pour ce calcul mathématique, on prend 1, et non 0, comme limite inférieure de la dernière classe; la valeur de 0 peut être rajoutée par la suite pour compléter l'intervalle.

Cette méthode donne une structure de classes qui présente un rapport progressif avec l'intensité du feu au front ou la longueur des flammes indiquées par l'IFM. Une autre façon de procéder serait de diviser simplement l'échelle de l'IFM de façon à ce que chaque classe ait une proportion prédéterminée du nombre de jours.

Simard et Valenzuela (1972) ont établi la distribution des conditions météorologiques et des composantes de la méthode de l'IFM pour 364 stations réparties dans tout le Canada, de même que les moyennes régionales et provinciales. Les données qu'ils ont ainsi obtenues indiquent que la sévérité des conditions météorologiques du point de vue des incendies augmente progressivement d'est en ouest dans tout le Canada, sauf que la Colombie-Britannique a à l'intérieur de ses limites à la fois les forêts les plus humides et les plus sèches au pays. Simard (1973) a reporté ces différences régionales sur une carte du Canada qui en donne la représentation la plus claire possible. Une méthode nationale d'évaluation du danger d'incendie donnant des valeurs uniformes sous les mêmes conditions météorologiques mais avec une répartition différente de ces valeurs entre les classes de danger d'une région à l'autre suivant les conditions météorologiques moyennes de chaque région convient bien, étant donné les différences qui existent à l'échelle du pays.

Latitude

La latitude, tout comme le moment de l'année, influe sur la longueur du jour et, par conséquent, sur l'importance du dessèchement possible au cours d'une journée. Dans la méthode de l'IFM, les conditions météorologiques sont mesurées à un moment seulement, soit à midi (heure locale standard), et les observations n'indiquent rien concernant la longueur du jour. Un coefficient pour la longueur du jour qui change chaque mois est compris dans l'IH et l'IS, mais la tendance dont il rend compte n'est valide, à strictement parler, que pour une seule latitude. L'ICL ne tient aucunement compte de la longueur du jour. L'intervalle réel des latitudes sous lesquelles se trouvent les forêts canadiennes est de plus de 20°, et il est juste de se demander si la méthode de l'IFM devrait ou non tenir compte de cet intervalle. Certaines études sont décrites ci-après.

Prenons d'abord l'ICL. Certaines moyennes horaires des conditions météorologiques enregistrées en juin à cinq stations situées dans un intervalle de latitude de 48° à 66° N. ont été analysées selon la méthode de calcul de l'ICL horaire décrite par Van Wagner (1977). Les valeurs obtenues pour l'ICL de 16 h ont été comparées avec celles de l'ICL normal calculées à partir des observations faites à midi qui sont censées donner une prévision pour la valeur réelle à 16 h. Les différences (valeur à 16 h moins valeur normale) variaient de 1,1, à 48° N., à 2,5, à 66° N., lorsque les valeurs de base de l'ICL étaient près de 80. Si l'on avait voulu apporter une correction, on aurait pu retarder progressivement l'heure normale d'observation de 12 h à environ 14 h des latitudes plus faibles aux plus élevées. En effet, l'heure à laquelle la température est maximale et l'humidité relative minimale en plein été est de plus en plus tardive, plus la latitude est élevée. Toutefois, les différences n'ont pas été jugées assez importantes pour qu'on recommande officiellement un changement. En d'autres mots, l'ICL rend assez bien compte, à toutes les latitudes, des conditions au moment où l'inflammabilité est maximale. Toutefois, l'intervalle des valeurs au cours de la journée en plein été diminue de façon marquée des basses latitudes aux hautes latitudes, ce qui signifie que le combustible léger reste inflammable une plus grande partie du jour lorsqu'on est plus près du nord.

Pour analyser l'effet de la latitude sur l'IH, on a calculé des coefficients théoriques pour la longueur du jour à trois latitudes (45, 55 et 65° N.) et on s'en est servi pour calculer les valeurs modifiées de l'IH au cours d'une saison assez sèche (plus précisément la saison de 1967 au lac La Biche). Les résultats obtenus sont présentés par comparaison à l'IH dans le tableau ci-dessous pour la période de six mois de mai à octobre.

	45° N.	55° N.	65° N.	Version normale
Moyenne pour la saison	34,5	32,4	30,0	31,9
Valeur maximale	85	83	78	88

Les résultats pour la version normale ne sont pas tout à fait bien ajustés par comparaison à ceux des trois versions spéciales, car les coefficients utilisés pour la longueur du jour dans la version normale avaient été établis empiriquement. Néanmoins, cette version représente assez bien le cas moyen. Plusieurs autres tests du genre ont été effectués, et les différences observées n'ont pas été jugées assez importantes pour qu'il vaille la peine d'apporter des corrections spéciales pour la latitude.

L'IS a été analysé de manière analogue avec les données sur les conditions météorologiques pour la même saison. En raison de la nature additive de la correction pour la longueur du jour dans l'IS, les différences sont plus élevées que pour l'IH, surtout vers la fin de la saison. Les résultats obtenus pour les trois versions théoriques sont présentés avec ceux pour la version normale dans le tableau ci-dessous portant sur la période de six mois de mai à octobre.

	45° N.	55° N.	65° N.	Version normale
Moyenne pour la saison	312	302	274	293
Valeur maximale	523	497	436	495

Là encore, les résultats pour la version normale sont représentatifs, et les variations qui existent n'ont pas été jugées assez grandes pour qu'on apporte des corrections spéciales à l'IS en fonction de la latitude.

Les trois études qui viennent d'être décrites reposaient sur des calculs. Pour une véritable analyse de l'effet de la latitude, il faudrait des données obtenues sur le terrain, ce dont on n'a pas encore en quantités suffisantes. Par ailleurs, comme les trois indices de l'humidité des combustibles traduisent fidèlement les conditions météorologiques et leur effet sur les combustibles d'une région à une latitude donnée, le problème des comparaisons portant sur des régions situées à des latitudes très différentes ne devrait pas devenir sérieux.

Conclusion

Comme la méthode de l'IFM a été conçue pour rendre compte du comportement des feux dans une forêt normalisée, ses indices auront une signification différente avec des types différents de forêts ou de combustibles. Même si l'on s'est d'abord surtout intéressé aux déchets de coupe de différents types (Muraro, 1971; Quintilio, 1972; Stocks, 1972), il s'est accumulé de plus en plus de données permettant d'établir un rapport entre la vitesse de propagation et les composantes de la méthode pour divers types de forêts et de végétation. En fait, la méthode de l'IFM n'est qu'une partie de la Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCEDIF), qui maintenant comprend également la méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt, laquelle fournit des estimations quantitatives du comportement des feux dans des types particuliers de combustibles. Celle-ci, dans une version provisoire (Alexander et coll., 1984), présente des équations pour la prévision de la vitesse de propagation des incendies dans 14 types de végétation et de déchets de coupe au Canada et indique les façons de calculer la croissance des incendies et les correctifs à apporter pour la topographie. C'est dans ce domaine que les travaux de recherche et de développement seront concentrés à l'avenir.

Ce que le terme «danger d'incendie» comprend et ne comprend pas dans le contexte canadien apparaît maintenant clairement. La MCEDIF tient compte des effets des conditions météorologiques (antérieures et actuelles), de la saison, de la teneur en eau des combustibles, de la topographie (en raison de son influence sur la teneur en eau du combustible léger et sur le comportement des feux) et du type de combustible sur la vitesse de propagation des incendies de forêt et leur rythme de production d'énergie. Elle ne tient pas compte (du moins, pas encore) de la présence d'agents déclencheurs, des effets de la topographie sur l'accès, ni de la difficulté générale d'application de tactiques particulières de suppression des incendies. Ces derniers points sont considérés comme faisant partie d'un domaine plus vaste, soit celui de la défense contre les incendies en général.

En terminant, quelques remarques au sujet des principes qui ont guidé l'élaboration de la méthode de l'IFM et de la Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt. Pendant les près de 60 années de travail qui nous ont donné la méthode actuelle, l'information requise a été obtenue soit par des échantillonnages au hasard sur le terrain, des expériences en conditions contrôlées sur le terrain, des expériences en laboratoire ou des méthodes reposant sur des principes de la physique ou des mathématiques. On a toujours fait reposer la formulation finale des équations sur des données ou des informations provenant d'au moins deux sources. Surtout, l'analyse finale a toujours été faite en fonction de l'expérience sur le terrain. La théorie et les résultats obtenus en laboratoire ont servi à la planification et à l'analyse des données de terrain, mais elles n'ont jamais été utilisées à la place de celles-ci sous prétexte qu'elles seraient supérieures. La démarche a donc toujours été nettement déductive, plutôt qu'inductive, et c'est à celà qu'on attribue l'efficacité de la méthode.

Ceci dit, tout ceux qui ont participé à l'élaboration de la méthode de l'Indice Forêt-Météo reconnaissent que des modifications peuvent parfois être souhaitables. La première exigence en ce qui concerne une méthode d'évaluation du danger d'incendie est que celle-ci rende bien compte des conditions naturelles. La deuxième est que l'information produite soit sous une forme qui convient aux organismes de lutte contre les incendies. Il serait présomptueux de penser que la méthode décrite est celle qui répond le mieux à ces deux critères. Avec les progrès de la recherche, certains concepts employés pourront devenir dépassés, et, avec l'évolution des pratiques de lutte contre les incendies, l'information requise par les organismes sur les conditions météorologiques et le comportement des feux pourra changer. On s'attend donc à ce que, conformément aux principes établis par J.G. Wright et H.W. Beall au cours des premières années de la recherche, la méthode d'évaluation du danger d'incendie continuera à évoluer en fonction des besoins pour la défense contre les incendies de forêt à l'échelle du Canada.

Ouvrages de référence

Alexander, M.E. 1982. Calculating spring Drought Code starting values in the Prairie Provinces and Northwest Territories. Northern Forest Res. Centre, Can. For. Serv., Forest Manage. Note 12. 4 p.

Alexander, M.E.; Lawson, B.D.; Stocks, B.J.; Van Wagner, C.E. 1984. User guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System, Interim Edition. Can. For. Serv. 76 p.

Beall, H.W. 1939. Tables for estimating the tracer index from early afternoon readings and table for diurnal hazard variation. Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Suppl. to Forest fire Res. Note 5. 20 p.

Beall, H.W. 1947. Research in the measurement of forest fire danger. Paper presented to Fifth Brit. Empire For. Conf. Reprinted in 1967 as Inform. Rep. FF-X-8, Can. Dep. For. Rural Develop., Forest Fire Res. Inst. 9 p.

Beall, H.W. 1948. Forest fire danger tables (provisional), 2nd edition revised. Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Forest Fire Res. Note 12. 73 p.

Byram, G.M. 1959. Combustion of forest fuels. Chapter 3 *in* K.P. Davis, ed. Forest Fire: control and use. McGraw-Hill, New York.

Canadian Forestry Service. 1970. Canadian Forest Fire Weather Index. Can. Dep. Fish. Forest., Can. For. Serv. 25 p.

Engisch, R.L.; Walker, J.D. 1971. PDP-8L version of Simard's Fire Weather Index Program. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Intern. Rep. PS-23. 10 p.

Forestry Branch. 1957. Forest fire danger tables, 1956. Can. Dep. Northern Aff. Nat. Resources, For. Br. Issued separately for following regions: Newfoundland, New Brunswick, Ontario, Manitoba, Alberta East Slope. 14 p.

Forestry Branch. 1959. Forest fire danger tables. Can. Dep. Northern Aff. Nat. Resources, For. Br. Issued separately for Saskatchewan and Alberta. 14 p.

Harrington, J.B.; Flannigan, M.D.; Van Wagner, C.E. 1983. A study of the relations of components of the Fire Weather Index to monthly provincial area burned by wildfire in Canada 1953-80. Can. For. Serv., Petawawa Nat. For. Inst., Inf. Rep. PI-X-25. 65 p.

Kean, W.A. 1975. A PDP-8L program for calculating the Fire Weather Index. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Inf. Rep. PS-X-57. 12 p.

Kiil, A.D.; MacTavish, J.S. 1962. Forest fire danger tables: District of Mackenzie, Northwest Territories. Can. Dep. For., Forest Res. Br. 12 p.

Kiil, A.D.; Miyagawa, R.S.; Quintilio, D. 1977. Calibration and performance of the Canadian Fire Weather Index in Alberta. Can. For. Serv., Northern Forest Res. Centre, Inf. Rep. NOR-X-173. 45 p.

Kourtz, P.H. 1980. A calculator program for the Canadian Forest Fire Weather Index (magnetic card version). Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Nat. For. Inst., Inf. Rep. PI-X-3. 10 p.

Lawson, B.D. 1972. An interpretive guide to the Canadian Forest Fire Behavior System. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre, Inf. Rep. BCP-3-72. 17 p.

Lawson, B.D. 1977. Fire Weather Index: the basis for fire danger rating in British Columbia. Fisheries and Environ. Can., Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre, Inf. Rep. BC-P-17. 24 p.

MacTavish, J.S. 1965. Forest fire danger tables: British Columbia Coast. Can. Dep. For. Publication 1099. 20 p.

McArthur, A.G. 1967. Fire behavior in eucalypt forests. Australia Forest. Timber Bureau, Forest Res. Inst. Canberra. Leafl. 107. 36 p.

Muraro, S.J. 1968. A modular approach to a revised national fire danger rating system. *In* Contributions on the development of a national fire danger rating system. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre Inf. Rep. BC-X-37. 9 p.

Muraro, S.J. 1971. A burning index for spruce-fir logging slash. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre. Suppl. BC-3 to Canadian Forest Fire Behavior System. 16 p.
Muraro, S.J.; Russell, R.N.; Lawson, B.D. 1969. Development of diurnal adjustments table for the Fine Fuel Moisture Code. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre, Inf. Rep. BC-X-35. 24 p.
Muraro, S.J.; Lawson, B.D. 1970. Prediction of duff moisture distribution for prescribed burning. Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre, Inf. Rep. BC-X-46. 23 p.
Nelson, R.M. 1964. The National Fire Danger Rating System: Derivation of Spread Index for eastern and southern states. U.S. Forest Serv., Southeastern Forest Exp. Sta. Res. Pap. SE-13. 44 p.
Nikleva, S. 1975. Atmospheric Environment Service Fire Weather Program for British Columbia. Can. Dep. Environ., Atmos. Environ. Serv. (Pacific Region). 30 p.
Nikleva, S.; Parent, L.E. 1971. Calculation of fire danger indices by computer. Can. Dep. Environ., Atmos. Environ. Serv. Tech. Mem. TEC757. 7 p.
Paul, P.M. 1969. Field practices in forest fire danger rating. Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst. Inf. Rep. FF-X-20. 27 p.
Paul, P.M. 1970. Fire weather forecasting for the Maritime Provinces (1964-70). Can. For. Serv., Maritimes Forest Res. Centre, Inf. Rep. M-X-22. 79 p.
Paul, P.M.; MacTavish, J.S. 1965. Forest fire danger tables: British Columbia – Cariboo. Can. Dep. For. Publication 1101. 18 p.
Pouliot, L. 1974. Prévision de météorologie forestière au Québec. Environ. Can., Serv. can. forêts, Inst. rech. feux forêt, Rap. Inf. FF-X-49. 33 p.
Quintilio, D. 1972. A burning index for lodgepole pine logging slash. Can. For. Serv., Northern Forest Res. Centre, Suppl. NFRC-1 to Canadian Forest Fire Behavior System.
Service canadien des forêts. 1972. Indice Forêt-Météo: méthode canadienne (provisoire). Serv. can. forêts, Inst. rech. feux forêt.
Service canadien des forêts. 1976. Indice Forêt-Météo: Méthode canadienne. Environ. Can., Serv. can. forêts. Rapp. tech. de for. 13F. 66 p.
Service canadien des forêts. 1978. Indice Forêt-Météo: Méthode canadienne. Environ. Can., Serv. can. forêts. Rapp. tech. de for. 25F. 56 p.
Service canadien des forêts. 1984. Tables de l'Indice Forêt-Météo de la méthode canadienne. Environ. Can., Rapp. techn. de for. nº 25 (4e éd.) 66 p.
Simard, A.J. 1970a. Reference manual and summary of test fire, fuel moisture, and weather observations made by forest fire researchers between 1931 and 1961. Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst. Inf. Rep. FF-X-25. 113 p.
Simard, A.J. 1970b. Computer program to calculate the Canadian Forest Fire Weather Index. Environ. Can., Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst., Internal Rep. FF-12. 18 p.
Simard, A.J. 1971. Calibration of surface wind speed observations in Canada. Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst., Inf. Rep. FF-X-30. 19 p.
Simard, A.J. 1973. Forest fire weather zones of Canada. Environ. Can., Can. For. Serv.
Simard, A.J.; Valenzuela, J. 1972. A climatological summary of the Canadian Forest Fire Weather Index. Can. For. Serv., Forest Fire Res. Inst. Inf. Rep. FF-X-34. 425 p.
Stocks, B.J. 1971. Fire severity index distribution in Ontario 1963 to 1968. Can. For. Serv., Great Lakes Forest Res. Centre, Inf. Rep. O-X-151. 18 p.
Stocks, B.J. 1972. A burning index for jack pine logging slash. Can. For. Serv., Great Lakes Forest Res. Centre. Suppl. ONT-1 to Canadian Forest Fire Behavior System.
Stocks, B.J. 1974. Wildfires and the Fire Weather Index System in Ontario. Environ. Can., Can. For. Serv., Great Lakes Forest Res. Centre, Inf. Rep. O-X-213. 17 p.
Turner, J.A. 1966. The stored moisture index: a guide to slash burning. Brit. Columbia Forest Serv., Protection Div. 7 p.
Turner, J.A. 1972. The Drought Code component of the Canadian Forest Fire Behavior System. Can. Dep. Environ., Can. For. Serv. Publication 1316.

Turner, J.A. 1973. A fire load index for British Columbia. Environ. Can., Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre, Inf. Rep. BC-X-80. 16 p.
Turner, J.A.; Lawson, B.D. 1978. Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System. Environ. Can., Can. For. Serv., Pacific Forest Res. Centre, Inf. Rep. BC-X-177. 40 p.
U.S. Forest Service. 1958. Manual for forest fire control. U.S. Forest Serv., Northeastern Forest Fire Protection Comm., Chatham, N.Y.
U.S. Forest Service. 1966. Derivation of spread phase tables, National Fire Danger Rating System. U.S. Forest Serv., Div. Fire Control. 54 p.
Van Wagner, C.E. 1970a. An index to estimate the current moisture content of the forest floor. Can. Dep. Fish. For., Can. For. Serv. Publication 1288. 23 p.
Van Wagner, C.E. 1970b. Conversion of Williams' severity rating for use with the Fire Weather Index. Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Inf. Rep. PS-X-21. 5 p.
Van Wagner, C.E. 1972a. Equilibrium moisture contents of some fine fuels in eastern Canada. Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta. Inf. Rep. PS–X–36. 11 p.
Van Wagner, C.E. 1972b. A diurnal table for the Fine Fuel Moisture Code. Can. For. Serv., Petawawa Forest Expt. Sta. Inf. Rep. PS-X-38. 8 p.
Van Wagner, C.E. 1972c. Duff consumption in eastern pine stands. Can. J. Forest Res. 2(1): 34-39.
Van Wagner, C.E. 1974. Effect of duff weight on drying rate. Can. For. Serv. Bi-Mon. Res. Notes 30(2): 11-12.
Van Wagner, C.E. 1977. A method of computing fine fuel moisture content throughout the diurnal cycle. Environ. Can., Can. For. Serv., Petawawa Forest Exp. Sta., Inf. Rep. PS-X-69. 15 p.
Van Wagner, C.E. 1979. A laboratory study of weather effects on the drying rate of jack pine litter. Can. J. Forest Res. 9(2): 267-275.
Van Wagner, C.E.; Pickett, T.L. 1985. Équations et programme FORTRAN de l'Indice Forêt-Météo de la méthode canadienne. Serv. can. forêts. Rapp. tech. de for. nº 33F. 24 p.
Williams, D.E. 1959. Fire season severity rating. Can. Dep. Northern Aff. Nat. Resources, Forest Res. Div. Tech. Note 73. 13 p.
Williams, D.E. 1964. Forest fire danger manual. Can. Dep. For. Publication 1027. 28 p.
Wright, J.G. 1933. Forest-fire hazard tables for mixed red and white pine forests. Can. Dep. Interior, For. Serv., Forest Fire Hazard Pap. 3. 20 p.
Wright, J.G. 1937. Preliminary improved fire hazard index tables for pine forests at Petawawa Forest Experiment Station. Can. Dep. Mines Resources, Dominion Forest Serv.
Wright, J.G.; Beall, H.W. 1938. Preliminary improved forest fire hazard tables for eastern Canada. Can. Dep. Mines & Resources, Dominion Forest Serv. Forest Fire Res. Note 5. 42 p.

Annexe I

Symboles

Symboles

Voici la liste de toutes les grandeurs utilisées dans les équations; elles sont représentées par une seule lettre, parfois accompagnées d'un indice. Les symboles sont regroupés suivant leur place dans l'ensemble. Toutes les teneurs en eau sont en pourcentage de la masse anhydre.

Conditions météorologiques

T – température à midi, °C

H – humidité relative à midi, %

W – vitesse du vent à midi, km/h

r – pluie en général

r_o – pluie mesurée à découvert à midi, mm

r_f – pluie réelle (ICL)

r_e – pluie réelle (IH)

r_d – pluie réelle (IS)

r_w – précipitation totale au cours de l'hiver (IS)

Indice du combustible léger (ICL)

m_o – teneur en eau du combustible léger de la veille

$\triangle m$ – changement de la teneur en eau du combustible léger dû à la pluie

m – teneur en eau du combustible léger après dessèchement

E_d – teneur en eau à l'équilibre du combustible léger pour le dessèchement

E_w – teneur en eau à l'équilibre du combustible léger pour le mouillage

k_o – valeur intermédiaire de k

k – vitesse de dessèchement ou de mouillage logarithmique, log m/jour

k_d – vitesse de dessèchement logarithmique

k_w – vitesse de mouillage logarithmique

F_o – ICL de la veille

F – ICL du jour

Indice de l'humus (IH)

M_o – teneur en eau de l'humus de la veille

M_r – teneur en eau de l'humus après la pluie

M – teneur en eau de l'humus après séchage

K – vitesse de dessèchement logarithmique pour l'IH, log M/jour

L_e – longueur réelle du jour pour l'IH, heures

b – coefficient pour l'effet de la pluie sur l'IH

P_o – IH de la veille

P_r – IH après la pluie

P – IH du jour

Indice de sécheresse (IS)

Q – humidité équivalente de l'IS, unités de 0,01 po d'eau

Q_o – humidité équivalente de l'IS de la veille

Q_r – humidité équivalente après la pluie

Q_f – humidité équivalente finale à l'automne

Q_s – humidité équivalente de départ au printemps

V – évapotranspiration potentielle, multiples de 0,01 po d'eau par jour

L_f – coefficient de la longueur du jour pour l'IS

D_o – IS de la veille

D_r – IS après la pluie

D – IS du jour

Indice de propagation initiale (IPI)

f(W) – facteur vent

f(F) – facteur humidité du combustible léger

R – IPI du jour

Indice du combustible disponible (ICD)

U – ICD du jour

Indice Forêt-Météo

f(D) – facteur humidité de l'humus

B – IFM (forme intermédiaire)

S – IFM du jour

Indices de sévérité

IJS – indice journalier de sévérité

ISS – indice saisonnier de sévérité